Aus dem Institut für Landtechnik
der Technischen Universität München-Weihenstephan
Direktor: Professor Dr. H. L. Wenner

AUSWIRKUNGEN DER MINIMALBESTELLTECHNIK AUF PHYSIKALISCHE BODENEIGENSCHAFTEN

Vom Fachbereich für Landwirtschaft und Gartenbau
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Dr. agr.
genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Diplom-Agraringenieur Harry Knittel

I. Berichterstatter: Prof. Dr. H. L. Wenner
II. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Fischbeck
III. Berichterstatter: Prof. Dr. H. Hanus

Tag der Einreichung der Arbeit: 5. 2. 1975
Tag der Annahme der Arbeit: 19. 3. 1975
Tag der mündlichen Prüfung: 20. 3.1975

Zum Gedenken an meine Frau

Gertraud Knittel

+ 11.12.1974

V O R W O R T

Die vorliegende Dissertation wurde in den Jahren 1972 bis 1974 am Institut für Landtechnik der Technischen Universität München in Weihenstephan durchgeführt. Sie entstand im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 140 Landtechnik (Verfahrenstechnik der Körnerfruchtproduktion) unter Leitung von Herrn Dr. ESTLER, dem für die Organisation des Forschungsprojektes an dieser Stelle gedankt sei.

Ziel des Forschungsvorhabens war, den Bearbeitungseffekt und die technischen Kenndaten unterschiedlicher Gerätekombinationen für die Minimalbestelltechnik zu erarbeiten. Während in dieser Arbeit der Bearbeitungseffekt dargestellt wird, hat ZELTNER in parallel laufenden Untersuchungen die technischen und pflanzenbaulichen Kenndaten ermittelt. Für die gute Zusammenarbeit bedanke ich mich recht herzlich.

Meinem hochverehrtem Lehrer, Herrn Prof. Dr. WENNER, gilt mein besonderer Dank. Er gab bei der Zusammenstellung der Arbeit in anregenden Diskussionen eine wertvolle Hilfestellung. Den Berichterstattern Herrn Prof. Dr. FISCHBECK und Herrn Prof. Dr. HANUS sei für die Hinweise und Anregungen gedankt, aber auch für die Überlassung des Bodenlabors, in dem alle bodenphysikalischen Untersuchungen durchgeführt wurden.

Nicht zuletzt möchte ich allen Mitarbeitern der Landtechnik Weihenstephan, die bei der Durchführung der Versuche mitgeholfen haben, herzlich danken.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft gebührt der Dank für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Freising, April 1975

Harry Knittel

Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Einleitung 1

1.1 Bedeutung der Minimalbestelltechnik 1
1.2 Zielsetzung der Arbeit 3

2. Literaturübersicht 5

2.1 Verfahren der Minimalbestelltechnik 5
2.2 Auswirkungen reduzierter Oberflächenbearbeitung auf die physikalischen Bodeneigenschaften 7

1. Zerkleinerungseffekt 7
2. Auswirkungen auf das Bodengefüge 8
3. Reduzierung der Spurschäden 9

2.3 Auswirkungen reduzierter Grundbodenbearbeitung auf die physikalischen Bodeneigenschaften 10

1. Zunahme der Lagerungsdichte 10
2. Biologische Auflockerung 11
3. Bedeutung für den praktischen Ackerbau 12

2.4 Zusammenfassung der Literaturübersicht 13

3. Versuchsanstellung und Methoden 14

3.1 Bodenbearbeitungsvarianten und Versuchsanlage 14
3.2 Versuchsstandorte 17

3.2.1 Klima und Witterung 18
3.2.2 Bodentyp und Bodenart 19
3.2.3 Der ackerbauliche Wert der Standorte 19

Seite

3.3 Untersuchungsmethoden 23

3.3.1 Bodenwiderstandsmessung 23

3.3.2 Aggregatanalyse 27

3.3.3 Untersuchung des Bodengefüges 28

4. Ergebnisse 33

4.1 Aussagewert der Untersuchungsmethoden 33

4.2 Der Bodenwiderstand 36

4.2.1 Einfluß physikalischer Bodeneigenschaften auf den Bodenwiderstand 36

4.2.2 Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf den Bodenwiderstand 43

4.3 Zerkleinerungseffekt der Minimalbestellgeräte 48

4.3.1 Oberflächenbearbeitung auf gepflügter Ackerkrume 48

1. Einfluß von Schar- und Kreiselpflug auf die Zerkleinerung durch die Minimalbestellgeräte 48
2. Zerkleinerungseffekt der Minimalbestellgeräte 50
3. Einfluß der Bodenfeuchte auf die Zerkleinerung durch die Minimalbestellgeräte 53

4.3.2 Oberflächenbearbeitung ohne Pflugfurche 55

1. Zerkleinerungseffekt zweier Fräsen 55
2. Einfluß des Pflügens auf den Zerkleinerungseffekt der Fräse 56
3. Einfluß der Bissenlänge und der Bodenfeuchte auf den Zerkleinerungseffekt der Fräse 58

4.3.3 Leistungsaufwand und Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte 65

Seite

1. Spezifischer Zerkleinerungsaufwand der Fräse 66
2. Spezifischer Zerkleinerungsaufwand der Minimalbestellgeräte 68

4.4. Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf die physikalischen Bodeneigenschaften 78

4.4.1 Bodengefüge an der Oberfläche (0 - 10 cm) 80
1. Einfluß von Schar- und Kreiselpflug auf die Auswirkungen der Bestellgeräte 86
2. Auswirkungen der Bestellgeräte auf das Bodengefüge 90
3. Einfluß des Aggregatgemisches auf physikalische Bodeneigenschaften 94

4.4.2 Bodengefüge in mittlerer Krumentiefe (10 - 20 cm) 99

4.4.3 Bodengefüge im Unterboden (25 - 30 cm) 108
1. Auswirkungen des Pflügens auf das Bodengefüge der Pflugsohle 109
2. Entwicklung der Pflugsohle nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung 113

5. Diskussion der Ergebnisse 119
1. Bearbeitbarkeit des Bodens 119
2. Zerkleinerungseffekt der Minimalbestellgeräte 122
3. Der spezifische Zerkleinerungsaufwand 127
4. Entwicklung des Bodengefüges nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung 129

6. Zusammenfassung 133

7. Literaturzusammenstellung 136

8. Anhang 152

1. Einleitung

1.1 Bedeutung der Minimalbestelltechnik

Die Bodenbearbeitung nimmt im Ackerbau neben der Düngung, Züchtung und Fruchtfolge eine zentrale Stellung ein. Fehler bei der Bearbeitung und Aussaat lassen sich selten ausbessern, so daß empfindliche Ertragseinbußen entstehen können. Aus diesem Grunde setzen sich neuere Bodenbearbeitungsverfahren gegenüber dem konventionellen, das in der Vergangenheit einen sicheren Ertrag brachte, nur zögernd durch.

Soll jedoch im Zuge der wirtschaftlichen Entwicklung auch im Ackerbau ein höheres Einkommen erzielt werden, muß man die Arbeitsproduktivität steigern. Eine Steigerung ist unter den heutigen Verhältnissen nur dann möglich, wenn es gelingt, in der gleichen Zeit wie früher eine größere Fläche zu bearbeiten. Die Möglichkeiten zur Leistungssteigerung mit konventionellen Bearbeitungsgeräten liegen in der Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit oder in der Verbreiterung der Geräte. Einerseits steigt aber der Zugwiderstand sowohl mit der Arbeitsbreite als auch mit der Geschwindigkeit - mit der Geschwindigkeit sogar exponentiell - so stark an, daß der Leistungsverlust über den Schlupf der Schlepperräder sehr groß wird. Andererseits wird die Bearbeitungsqualität schlechter; denn je schneller man mit den Geräten zur Saatbettbereitung fährt, desto mehr drückt der Zugwiderstand die Zinken der Eggen aus dem Boden. Die Bearbeitung wird unregelmäßig und zu flach.

Die Flächenleistung der Bodenbearbeitung nach herkömmlicher Art - Pflügen, mehrmaliges Eggen und anschließend Aussaat - ist somit an der Leistungsgrenze angelangt. Es ist daher notwendig, nach neuen Bestellverfahren Ausschau zu halten. Als Alternative zum

konventionellen Bearbeitungsverfahren bieten sich die Verfahren der Minimalbestelltechnik an. Hierzu zählen alle Verfahren, bei denen die Saatbettbereitung und Aussaat in einem Arbeitsgang zusammengefaßt sind. Aus der Kombination dieser Arbeitsgänge ergibt sich das Problem, entweder in einem Arbeitsgang mit verstärktem Geräteaufwand ein optimales Saatbett herzurichten, oder mit geringerem Aufwand eine schlechtere Bearbeitungsqualität in Kauf zu nehmen. Im letzteren Fall sollte aber der Verlust durch die schlechtere Bearbeitungsqualität den Gewinn durch die Aufwandseinsparung nicht aufheben.

Der Einsatz der Minimalbestellgeräte fordert,daß in einem Arbeitsgang ein optimales Saatbett bereitet werden kann. Es ist daher notwendig, daß die Zerkleinerungsintensität eines Bestellgerätes verstellbar ist, da die Bearbeitbarkeit des Bodens den Zerkleinerungseffekt sehr stark beeinflußt. Die Möglichkeiten der konventionellen Gerätekombinationen zur Änderung des Bearbeitungseffektes liegen in der Wahl der Werkzeugform, in der Gerätestaffelung, in der Variation der Fahrgeschwindigkeit, hauptsächlich aber in der Anzahl der Arbeitsgänge zur Saatbettbereitung. Mit der Anzahl der Arbeitsgänge wird jedoch durch das Befahren des gepflügten Bodens der Lockerungseffekt der Grundbodenbearbeitung in steigendem Umfang zunichte gemacht.

Die Zerkleinerungsintensität der Miniamalbestellgeräte läßt sich nur über zapfwellengetriebene Werkzeuge steuern. Durch Variation Werkzeuggeschwindigkeit oder der Fahrgeschwindigkeit kann der Effekt verändert werden. Erst die Möglichkeit, in einem Arbeitsgang ein günstiges Saatbett zu bereiten, läßt eine Kombination von Saatbettbereitung und Aussaat zu. Die Schwierigkeit liegt jedoch darin, daß keine exakten Angaben über ein optimales Krümelgemisch vorliegen. Nach einer allgemeinen Forderung sollte es so beschaffen sein, daß die Pflanze für

die Keimung und später für ihr Wachstum günstige Luft- und Wasserverhältnisse antrifft.

Da man aber die Auswirkung der Bearbeitung erst gegen Ende der Vegetationsperiode am Mehr- oder Minderertrag der Pflanze abschätzen kann, erweist sich das Beurteilen des Bearbeitungseffektes sofort nach dem Arbeitsgang als sehr schwierig. Hinzukommt das Problem, daß die Einflüsse des späteren Witterungsverlaufes auf die Entwicklung der Pflanzen, aber auch auf die Entwicklung des Bodengefüges sehr groß sind. Die Beurteilung neuer Bearbeitungsgeräte kann deshalb nur durch einen direkten Vergleich mit einem Bearbeitungsverfahren erfolgen, das seit langem mit Standardgeräten durchgeführt wird und deren Ertragsbeeinflussung bekannt ist.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Bisher gibt es nur geringe Kenntnisse über die bodenphysikalische Wirkung der Minimalbestellgeräte, die in einem Arbeitsgang das Saatbett bereiten und das Saatgut ausbringen. Entsprechend ihrer Bedeutung ist es daher notwendig, den Arbeitseffekt der Geräte intensiver zu untersuchen, um Empfehlungen über den Einsatz der Geräte zu erarbeiten.

Ziel der Versuche war es, mit den Minimalbestellmaschinen im Boden dasselbe Bodengefüge zu erzeugen wie mit konventionellen Geräten. Es wurden daher mehrere Geräte der Minimalbestelltechnik ausgewählt und neben der konventionellen Gerätekombination eingesetzt. Um ein mit dem konventionellen Verfahren vergleichbares Saatbett zu erzeugen, wurde die Zerkleinerungsintensität der Minimalbestellgeräte den jeweiligen Bodenverhältnissen ent-

sprechend angepaßt.

Zur Klärung der alten Frage nach der "optimalen Krümelung" wurden zwei sich ergänzende Methoden angewandt. Zunächst wurde die Aggregatgrößenverteilung nach dem Herstellen des Saatbettes erfaßt, um die Ausgangssituation des Bodengefüges darzustellen, dann wurde zu verschiedenen Zeitpunkten an Stechzylinderproben das Porenvolumen, die Porengrößenverteilung und die Permeabilität untersucht, um den Aufbau und die Dynamik des Bodengefüges zu verfolgen.

Eine Definition der "optimalen" Krümelung kann im Rahmen dieser Arbeit nur insoweit gegeben werden, als das Standardverfahren einen empirischen Vergleichswert liefert, der eine Zuordnung der einzelnen Geräteeffekte erlaubt. Da aber technische Geräte einer ständigen Weiterentwicklung unterworfen sind, wird nach der Beurteilung der Geräte das Hauptgewicht auf eine allgemeingültige Aussage über die Beziehung zwischen Bearbeitbarkeit des Bodens, dem Zerkleinerungseffekt der Geräte und deren Auswirkungen auf die bodenphysikalischen Eigenschaften gelegt.

Die Saatbettbereitung nach einer Pflugfurche durch Geräte der Minimalbestelltechnik stellen keine grundsätzliche Abweichung von den Regeln der konventionellen Bearbeitungsverfahren dar. Sobald aber auf das Pflügen verzichtet wird, wie z.B. bei der Frässaat, bedarf ein solches Verfahren differenzierter Anbauregeln. Das Bodengefüge in der Krume hat nämlich einen völlig anderen Aufbau als nach dem Pflug. Deshalb konzentriert sich diese Arbeit auf die Auswirkungen der Bodenbearbeitungsverfahren in drei Bodenschichten:

1. an der Oberfläche (0 - 10 cm),
2. im mittleren Krumenraum (10 - 20 cm),
3. im Unterboden unter der Bearbeitungsgrenze (25 - 30 cm).

2. Literaturübersicht

2.1 Verfahren der Minimalbestelltechnik

Berichte über den Einfluß reduzierter Bodenbearbeitung befaßten sich zunächst mit dem Problem des Bodendruckes, als zu Beginn der fünfziger Jahre mit zunehmender Mechanisierung der Maschinen- und Schlepperverkehr auf dem Acker wuchs und sich immer deutlicher Strukturschäden in der Ackerkrume zeigten (Jamison et al., 1950 (61); Soehne, 1953 03); Moter, 1954 (80)). Das Schlepperrad verdichtet gegenüber dem Pferdehuf eine größere Fläche. Diese Verdichtung verursacht allgemein eine Abnahme der Grobporen und Verminderung der Durchlässigkeit (Rid, 1956 (92); Free, 1960 (44); Blake, 1964 (18); Lindner, 1966 (73); van Ouwerkerk, 1969 (84)). Zur Einschränkung der Spuren wurde die Arbeitsbreite der Geräte erhöht, es wurden gezogene Gerätekombinationen von Eggen, Feingrubbern, Rauhwalzen oder Krümlern (Feuerlein, 1964(42);Rid, 1958(93)) eingesetzt; vor allem aber wurden zapfwellengetriebene Geräte mit aktiv bewegten Zerkleinerungswerkzeugen, wie z.B. die Dreh- und Rüttelegge, konstruiert (Feuerlein, 1957 (39); Kohler, 1960 (69); Czeratzki, 1964 (29)). Neuere Geräte sind die Taumelwälzegge, der Zinkenrotor und die Kreiselegge (Estler, 1970 (37); Feuerlein, 1971 (42); Zeltner, 1972 (118)). Auch die Fräse hat seit einigen Jahren als Pflugfolgegerät wieder Beachtung erfahren, obwohl sie schon seit mehr als 50 Jahren existiert (Bornemann, 1922 (22); Holldack, Nitzsch, 1926 (59); Gade, 1929 (49); Martiny, 1931 (75)). Sobald in einem Arbeitsgang eine feinere Krümelung erzeugt werden konnte, war der Aufbau der Sämaschine auf die Geräte der Saatbettbereitung eine logische Folge der technischen Entwicklung , die durch die Konstruktion stärkerer Schleppertypen forciert wurde.

Eine weitere Reduzierung der Arbeitsgänge bedeutet die Kombination von Pflügen und Aussaat. In Nordamerika ist dieses Verfahren unter dem Begriff "plow-plant" seit 1955 aktuell (Musgrave, et al., 1955 (81); Hansen et al., 1959 (53); Meyer, Männering, 1959 (77); Free, 1960 (44); Bowers, Batemann, 1960 (24); Fanning, Brady, 1963 (38); Blake, 1964 (18); Philips, 1968 (87)). Doch schon zu Beginn des Jahrhunderts - 1907 - wurde eine Gerätekombination für das Pflügen und Maissäen im Katalog der Firma Rud.Sack angeboten (Sack, 1966 (98)). Als Vorläufer dieser "Pflug-Sä-Maschine" ist die Konstruktion von Locatelli, 1636 (121).

Die letzte Konsequenz der Minimalbestelltechnik ist der Verzicht auf jede Bodenbearbeitung und die direkte Aussaat in den unbearbeiteten Boden; eine Entwicklung, die durch die Erfindung der Totalherbizide ausgelöst wurde. In Nordamerika konnten die ersten Ergebnisse langjähriger Maisanbauversuche seit 1960 diskutiert werden (Moody et al., 1961 (79); Free et al., 1963 (45); Jones et al., 1968 (62); Triplett et al., 1968 (110); Shear et al., 1969 (101)); in Mittel- und Westeuropa, wo der Schwerpunkt der Anwendung im Getreidebau liegt, liefen die Versuche mit einer Verzögerung von etwa 10 Jahren an (Hood, 1965 (60); Arnott, Clement, 1966 (3); Bachthaler, 1967 (7); Baeumer, 1969 (9); Debruck, 1969 (32); Kahnt, 1969 (64); Teuteberg, 1969 (109); Stracke, 1969 (106); Boone, Kuipers, 1970 (71); Ouwerkerk, Boone, 1970 (85); Czeratzki, Ruhm, 1971 (29)).

Bei allen Maßnahmen reduzierter Bodenbearbeitung muß man zwischen den Verfahren unterscheiden, die nur die Krumenoberfläche bearbeiten, und solchen, die den gesamten Krumenraum lockern.

2.2 Auswirkungen reduzierter Oberflächenbearbeitung auf die physikalischen Bodeneigenschaften

1. Der Zerkleinerungseffekt

Die Oberflächenbearbeitung hat das Ziel, in möglichst wenig Arbeitsgängen die rauhe Oberfläche nach dem Pflügen einzuebnen und ein homogenes, feinkrümeliges unverdichtetes Saatbett herzustellen. Die ersten wissenschaftlichen Versuche der Gerätekombination unternahmen Roemer, 1925 (97) und Mangelsdorff, 1928 (74), denen es vor allem darum ging, durch die Anhängung einer Schleppe an den Pflug den Zerkleinerungseffekt zu erhöhen und durch weniger Arbeitsgänge die Bodenfeuchte im Frühjahr zu schonen.

Als pflanzenbauliches Beurteilungskriterium zog man den Anteil der Aggregate, die größer als 40 mm waren, heran. Je geringer deren Anteil war, desto besser war die Bearbeitung (Mangelsdorff, 1928 (74); Nitzsch, 1938 (83); Feuerlein, 1957 (39)). Die gezogenen Geräte der Oberflächenbearbeitung erzeugten ein rauheres Aggregatgemisch mit einem höheren Anteil der Aggregate 40 mm als zapfwellengetriebene Geräte mit rotierenden oder rüttelnden Werkzeugen (Kohler, 1960 (69); Rid, 1962 (94)). Unberücksichtigt blieben bei dieser Beurteilung die feineren Aggregatgrößen, die einen zumindest gleichen Einfluß auf den Aufbau des Bodengefüges haben. So hat Dojarenko (33) bereits 1926 nachgewiesen, daß mit zunehmendem Anteil der Aggregate 0,25 mm der Anteil der Grobporen vermindert wird.

Ergebnisse über die Beziehung zwischen Aggregatgemisch und den Grobporen sind sehr selten. Diese Beziehung wurde hauptsächlich in einigen Modellversuchen erforscht. Bornemann, 1922 (22), und Dojarenko, 1926 (33), fanden übereinstimmend mit Grable, Siemer, 1968 (51), und Kain, Agrawel, 1970(65), daß bei einem

Aggregatdurchmesser von 1 - 2 und 2 - 3 mm die günstigsten Wachstumsbedingungen herrschen, was einem Porenverhältnis von etwa 25 % kapillare Poren und 30 % nichtkapillare Grobporen entspricht. Kuipers 1961 (70) fand, daß bei einem Mittleren Durchmesser kleiner als 3 - 4 mm der Anteil der Grobporen sehr stark zurückgeht. Im praktischen Ackerbau werden aber gröbere Aggregatgemische erzeugt, sodaß derartige Versuche nur von theoretischer Bedeutung sind.

2. Auswirkungen auf das Bodengefüge

Praxisbezogene Berichte über den Einfluß der Zerkleinerung auf das Bodengefüge basieren meist auf Fräsversuchen, in denen die Fräse als Pflugersatz mit einer Arbeitstiefe von 20 bis 25 cm eingesetzt wurde. In diesen Versuchen erzeugte die Fräse ein weitaus feineres Aggregatgemisch als der Pflug, was wiederum ein höheres Porenvolumen mit einem höheren Grobporenanteil im Boden bewirkt (Holldack, Nitzsch, 1926 (59); Gade, 1929 (49); Kohler, 1960 (69)). Da dies nur Einzelversuche waren, konnte man zwar qualitative Aussagen über den Arbeitseffekt machen, aber funktionale Beziehungen zwischen Zerkleinerung und Bodengefüge sind nicht möglich.

In diesen alten Fräsversuchen zeigte sich, daß im Laufe der Vegetationsperiode das Bodengefüge einem stärkeren Sackungsprozeß unterworfen ist als das Gefüge gepflügter Böden. Bei den heutigen Fräsen, die anstelle der gefederten Haken ein feststehendes Messer haben und eine langsamere Umfangsgeschwindigkeit besitzen, konnten je nach Bodentyp Unterschiede im Porenvolumen beobachtet werden. Während Feuerlein 1957 (39) auf einem anmoorigen Boden und einem degradierten Lößboden nach dem Fräsen ein geringeres Porenvolumen findet als nach dem Pflügen, kann Rid 1966 (96) auf einer Parabraunerde keinen Unterschied feststellen. Um die Ursachen zu klären, fehlen bei diesen Unter-

suchungen Angaben über den Zerkleinerungseffekt der Fräse. Es scheint aber, als ob die Stabilität des Bodengefüges ebenso einen Einfluß hat wie die Größenverteilung der Aggregate.

De Boodt et al., 1961 (31), zeigten, daß auf strukturinstabilen Böden die Stabilität der Aggregate einen primären Einfluß auf das Pflanzenwachstum hat. Die Abnahme der Stabilität durch Bodenbearbeitungsmaßnahmen beruht im allgemeinen nicht nur auf dem Abbau der organischen Substanz, (Page, Williard, 1946 (86); Chang, 1949 (26); Strickling, 1950 (107)) und der damit verbundenen mangelnden Lebendverbauung (Sekera, 1951 (100)), sondern vor allem auf der mechanischen Beanspruchung der Aggregate (Williams, 1935 (113); Wichtmann, 1956 (112)). Die unstabile Wirkung der Fräsarbeit führt man neben dem Fehlen stützender Grobschollen unter dem Saatbett auf die Zertrümmerung der Aggregate zurück (Gade, 1929 (49); Beyer, 1933 (17); Grote, 1954 (52); Feuerlein, 1957 (39)), während man mit anderen Geräten, wie z.B. mit der Rüttelegge, ein Zerbrechen in vorgeformte, natürliche Aggregate erzielen soll (Kohler, 1960 (69)).

Ein Kriterium der Vorzüglichkeit eines Gerätes ist der Leistungsbedarf, der notwendig ist um eine bestimmte Zerkleinerung zu erzeugen. Diese sogenannte Effektivität eines Gerätes hat Gallwitz, 1957 (50), an der Fräse in einer Bodenrinne untersucht. Bei verschiedenen Werkzeugen steigt der Zerkleinerungseffekt linear mit dem Leistungsaufwand, d.h. je feiner der Boden zerkleinert wird, desto höher ist der Leistungsbedarf. Für alle anderen Geräte, auch die Minimalbestellgeräte fehlen derartige Angaben über die Effektivität.

3. Reduzierung der Spurschäden

Eine Reduzierung der Schlepperfahrten zur Saatbettbereitung wirkt sich am stärksten auf das Gefüge der gepflügten Krume aus, weil das Maximum der Verdichtung in 10 - 15 cm Tiefe

liegt (Weaver, 1950 (111); Söhne, 1961 (104); Arndt, 1966 (2); Soane et al., 1970 (102)). Durch weniger Spuren wird die Durchlüftung und Wasserinfiltration der Krume verbessert. In feuchten Jahren und/oder staunassen Böden schafft die geringere Verdichtung günstigere Wachstumsverhältnisse, in trockenen Jahren und/oder in Böden mit guter Wasserführung oder zu geringer Wassernachlieferung schlechtere. Im ersten Fall bestimmt der O_2-Gehalt der Bodenluft als Minimumfaktor das Wachstum, im letzteren die Wasserverfügbarkeit (Meyer, Mannering, 1959 (77); Swamy Rao et al., 1960 (108); Fanning, Brady, 1963 (38); Blake, 1964 (18)).

Der Nachteil einer rauhen Oberflächengestaltung durch den Scharpflug läßt sich durch den Einsatz des Kreiselpfluges aufheben, der auch auf schweren Böden eine ebene und feinkrümelige Oberfläche erzeugt, die eine weniger intensive Nachbearbeitung erfordern soll (Feuerlein, 1964 (41); Freund, 1968 (47); Zach et al., 1973 (116). Das Bodengefüge im mittleren Krumenraum zeigt nach der Bearbeitung mit dem Kreiselpflug im Vergleich zu der mit dem Scharpflug einen größeren Bodenwiderstand, ein geringeres Porenvolumen und geringere Durchlässigkeit. Die Pflugsohlenbildung ist gerade bei feuchtem Bodenzustand weniger ausgeprägt (Feuerlein, 1964 (41); Freund, 1968 (47)). Untersuchungen über die Pflugsohlenbildung bei normalen Bodenverhältnissen fehlen dagegen.

2.3 Auswirkungen reduzierter Grundbodenbearbeitung auf die physikalischen Bodeneigenschaften

1. Zunahme der Lagerungsdichte

Die Hauptaufgabe der Grundbodenbearbeitung ist es, durch Lokkerung der gesamten Krume den Durchwurzelungsraum zu vergrößern. Bei Verzicht auf die Grundbodenbearbeitung sinkt das Porenvolumen um 3 - 8 % hauptsächlich durch Abnahme der Grobporen (Free et al., 1960 (44); Shear et al., 1969 (101); Buhtz et al., 1970(25);

Ouwerkerk, Boone, 1970 (85); Czeratzki, Ruhm, 1971 (29); Baeumer et al., 1971 (8); Ehlers, 1973 (35)). In der Pflugsohle macht die bereits nach einem Jahr einsetzende Lockerung (Hanus, 1968 (55)) bei einem längeren Pflugverzicht nur noch wenig Fortschritte. Tendenzen zur Auflockerung bestehen zwar, aber die Pflugsohle ist als Bearbeitungsgrenze noch eindeutig vorhanden (Soane et al., 1970 (102)).

2. Biologische Auflockerung

Trotz der Abnahme der Grobporen wird die Regeninfiltration nicht gehemmt, sondern gefördert (Jones et al., 1968 (62); Triplett et al., 1968 (110); Jones et al., 1969 (63);Baeumer et al., 1971 (8); Czeratzki, Ruhm 1971 (29)). Dieser Widerspruch läßt sich dadurch erklären, daß sich an der Oberfläche durch die Reste der Nutzpflanzen und totgespritzten Unkräuter eine Mulchschicht aufbaut, die eine größere Niederschlagsmenge speichern kann, ohne daß Verschlämmungs- und Erosionsschäden auftreten. Andererseits kommt es in der Krume und im Unterboden zu einer Anreicherung von Regenwurmgängen, die die Porenkontinuität des gesamten Bodens erhöhen und das Niederschlagswasser entgegen den hydraulischen Gradienten in den Unterboden eindringen lassen (Baeumer et al., 1971 (8);Ehlers, 1973 (35)). Differenzierter verhält sich die Infiltration in den niederschlagsärmeren Zonen auf leichten Böden, wo im Frühjahr auf konventionell bearbeiteten Böden eine höhere Durchlässigkeit herrscht. Während des Sommers geht sie jedoch so stark zurück, daß im Herbst auf Direktsaatflächen die Durchlässigkeit größer ist (Bosse et al., 1969 (23); Buhtz et al., 1970 (25)).

3. Bedeutung für den praktischen Ackerbau

Das dichtere Gefüge in der oberen Krume und die schnelle Regeninfiltration verbessern die Tragfähigkeit des Bodens, sodaß die Spurschäden auf einer Direktsaatfläche weitaus geringer sind als auf gepflügten Flächen (Soane et al., 1970 (102)).

Die größere Wasserhaltefähigkeit der Direktsaatflächen erklärt auch den zeitweiligen Mehrertrag, den man in wärmeren Klimazonen der USA und Israels erzielte (Stibbe, Ariel, 1970 (105); Jones et al., 1968 (62)). Im allgemeinen konnte in wärmeren Klimazonen kein Minderertrag festgestellt werden. In Europa dagegen hatte das Direktsaatverfahren keinen Erfolg, da man die Verunkrautung - speziell durch die Quecke (Agropyron repens) - nicht eindämmen konnte, die Saatgutablage in den Boden unbefriedigend war, und die Nährstoffakkumulation in der oberen Krumenschicht bei der ortsüblichen intensiven Düngung fast in einen schädigenden Bereich geriet (Kahnt, 1969 (64); Debruck, 1969 (32); Ehlers et al., 1972 (34)). Auf Grund der schlechten Erträge ist demnach das Verfahren der Direktsaat für den praktischen Ackerbau ungeeignet.

2.4 Zusammenfassung der Literaturübersicht

Der Wandel der Bodenbearbeitung vollzog sich unter dem Fortschrittszwang neuer technischer Möglichkeiten, unterstützt durch neue Erkenntnisse über den Wasser- und Lufthaushalt im Boden. Somit steht die Bodenbearbeitung an einem Punkt, an dem jedes Verfahren - unter Berücksichtigung von Klima und Boden richtig angewendet - anderen überlegen sein kann.

Eine Reduzierung der Arbeitsgänge zur Saatbettbereitung auf gepflügtem Boden bewirkt im unteren Teil der Krume eine geringere Verdichtung.

Nicht geklärt blieben drei Fragen:

1. Können die Geräte der Minimalbestelltechnik, die nach dem Pflügen in einem Arbeitsgang das Saatbett herrichten und die Saat ausbringen, an der Oberfläche ein dem konventionellen Verfahren entsprechendes Saatbett bereiten?

2. Welcher Leistungsbedarf ist zur Erzeugung eines bestimmten Zerkleinerungseffektes notwendig?

3. Welche Beziehungen bestehen zwischen der Aggregatgrößenverteilung und den physikalischen Bodeneigenschaften unter natürlichen Anbauverhältnissen?

Bei einem Verzicht auf die Grundbodenbearbeitung ist die Dichtlagerung im mittleren Krumenraum besonders augenfällig. Bei der Frässaat wird der obere Teil der Krume gelockert, der untere Teil wird nicht bearbeitet. Aus dieser Problematik ergeben sich ebenfalls drei Fragen, die zu beantworten sind:

1. Verursacht die heutige Fräse bei einer Arbeitstiefe von 6-8cm ähnliche Strukturschäden an der Oberfläche wie die älteren Fräsen?

2. Bildet sich unter der Bearbeitungsgrenze des Fräsens ähnlich wie beim Pflügen ein Verdichtungshorizont (Frässohle)?

3. Tritt unter der flachgefrästen Oberfläche eine ökologische Auflockerung ein?

3. Versuchsanstellung und Methoden

3.1 Bodenbearbeitungsvarianten und Versuchsanlage

Es wurden vier Geräte der Minimalbestelltechnik ausgewählt: Kreiselegge, Rüttelegge, Fräse und Feingrubber. Alle Geräte hatten eine aufgebaute Sämaschine, so daß in einem Arbeitsgang die Saatbettbereitung und Aussaat erfolgen konnte. Die Konstruktion der Geräte hat ZELTNER, 1975 (120) näher beschrieben, der gleichlaufend mit den in dieser Arbeit behandelten bodenphysikalischen Untersuchungen die technischen Probleme der Minimalbestellgeräte untersucht hat. Zeltner hat den Leistungsaufwand bei unterschiedlichen Bodenzuständen gemessen und zugleich die Saatgutablage mit nachfolgendem Aufgang und den Ertragskomponenten erfaßt. Deshalb wird in der vorliegenden Arbeit auf die Erträge überhaupt nicht eingegangen.

Die Grundbodenbearbeitung zur Lockerung der Krume wurde mit dem Schar- und Kreiselpflug durchgeführt. Der Kreiselpflug wurde in das Versuchsprogramm aufgenommen, da er im Gegensatz zum Scharpflug bereits eine ebene Oberfläche erzeugt, auf der man eventuell mit einer geringeren Zerkleinerungsintensität ein optimales Saatbett herrichten kann. Andere Geräte der Grundbodenbearbeitung, z.B. der Tiefgrubber, wurden nicht eingesetzt, um das Versuchsprogramm nicht zu umfangreich werden zu lassen.

Ein Teil der Versuchsfläche wurde nicht gepflügt, sondern nur an der Oberfläche bis zu 6 cm flach gefräst und zugleich bestellt (Frässaat). Die Fräse nahm eine Sonderstellung zwischen dem Pflug und dessen Nachbearbeitungsgeräten ein, da sie sowohl nach dem Pflug als auch ohne Pflug eingesetzt wurde. In der Versuchsanstellung ging es in erster Linie darum, die Weiterentwicklung des Bodengefüges unter der gefrästen Oberfläche zu verfolgen. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Ausbildung einer Frässohle und den Abbau der Pflugsohle gelegt.

Auf der ungepflügten Versuchsfläche wurden zwei Fräsen eingesetzt, die sich auf Grund ihrer Messerform und Umfangsgeschwindigkeit unterscheiden. Fräse (Howard) hat gerade Winkelmesser, Fräse (Rau) hat nach hinten abgewinkelte Messer. Die Umfangsgeschwindigkeit der Fräse (H)[1] lag bei 5.1 m/s, die der Fräse (R)[2] lag bei 5.3 m/s. Parallel zu diesen Versuchen wurden mit der Fräse (H) Modellversuche durchgeführt, in denen nach der Ernte auf Flächen, die nicht zum Standardversuch gehörten, der Einfluß der Bissenlänge und des Wassergehaltes auf den Zerkleinerungseffekt untersucht w rden. Die Lockerung durch den Scharpflug hat sich für die Saatbettbereitung in der Vergangenheit als ertragsicherste Maßnahme erwiesen. In dieser Arbeit stellen der Scharpflug und die konventionelle Eggenkombination Standardgeräte dar, mit denen alle neuen Geräte verglichen werden. Das Standardverfahren hatte folgenden Arbeitsablauf:

- Pflügen mit dem Scharpflug;
- Saatbettbereitung in zwei Arbeitsgängen mit einer Gerätekombination von Egge und Krümler;
- Aussaat mit der Drillmaschine.

---

[1] Abkürzung für Fräse Howard, auch im Verlauf der Arbeit nur Fräse (H).

[2] Abkürzung für Fräse Rau, auch im Verlauf der Arbeit nur Fräse (R).

Die Aufteilung der Versuchsflächen ergab folgendes Bild (Abb. 1):

- als Variation der Grundbodenbearbeitung die Blöcke: Scharpflug, Kreiselpflug und "ohne" Pflug;
- als Variation der Bestellgeräte:Konventionelle Kombination, Kreiselegge, Rüttelegge, Feingrubber und Fräse.

Zwischen den Fruchtfolgeparzellen war ein Zwischenraum von 5 m angelegt worden, um beim Aussetzen der Maschine am Ende der Parzellen die benachbarten Parzellen nicht befahren zu müssen.

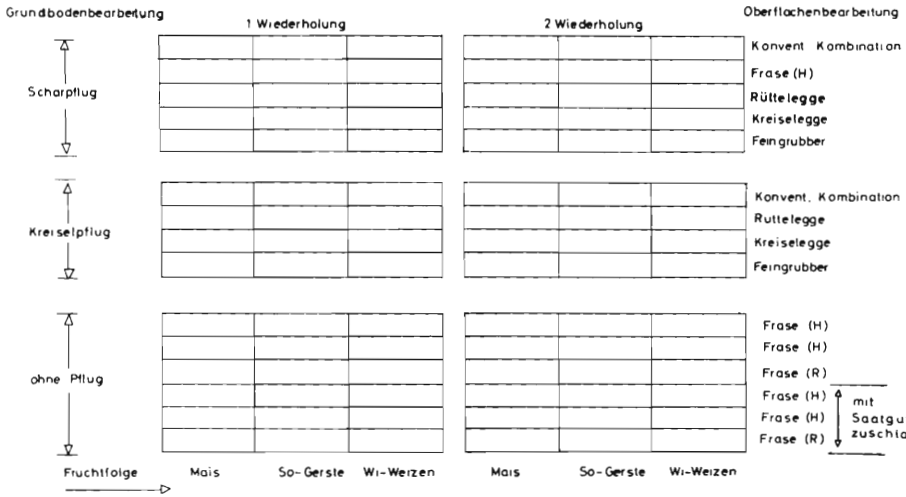

Abb. 1: Flächenplan des Bodenbearbeitungsversuches in Roggenstein.

Dieser Bodenbearbeitungsversuch wurde mit einigen Änderungen an drei Versuchsgütern der TU München-Weihenstephan und der Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenzüchtung - in Roggenstein, Dürnast und Frankendorf - durchgeführt.

Die Aufteilung nach dem Flächenplan (Abb. 1) stellt den langfristigen Standardversuch dar, wie er in Roggenstein seit Herbst 1971 und in Dürnast seit Herbst 1972 läuft. Abweichend von diesem Plan wurde in Dürnast die Fräse auch nach dem Kreiselpflug eingesetzt, um einen strengen Vergleich der Grundbodenbearbeitungsvarianten durchführen zu können. Zur besseren technischen Durchführung wurden Langparzellen (60 m in Roggenstein und 35 m in Dürnast) gewählt, von denen jede die doppelte Arbeitsbreite der Bestellgeräte hatte. Es wurden zwei Wiederholungen hintereinander angelegt; in jeder Wiederholung standen gleichzeitig die drei Pflanzenarten der Fruchtfolge. Bei dieser Einteilung mußte auf eine zufallsgemäße Versetzung der Wiederholung aus praktischen Gründen verzichtet werden.

Es wurde eine ortsübliche Fruchtfolge mit Körnermais, Winterweizen und Sommergerste zusammengestellt, da die Minimalbestellgeräte besonders nach der späten Körnermaisernte benötigt werden. Nach der Ernte des Getreides wurde das auf dem Acker verbliebene Stroh eingefräst und zugleich Raps zur Grunddüngung angesät. Vor dem Pflügen bzw. Fräsen wurde der Rapsbestand und das Maisstroh abgeschlegelt.

In Frankendorf wurden für zwei Vegetationsperioden und Kranzberg für eine Vegetationsperiode weitere Versuche mit den Pflugfolgegeräten angelegt um eine ergänzende Aussage über den Bodeneinfluß zu erhalten.

3.2 Versuchsstandorte

Die drei Versuchsstandorte liegen auf unterschiedlichen geologischen Ausgangsgestein

- Roggenstein bei Olching (530 m NN), Auelehm über Schotter
- Frankendorf bei Erding (460 m NN), Löß
- Dürnast bei Freising (480 m NN), Obere Süßwassermolasse

In der Vegetationsperiode 1971/72 wurde in Kranzberg bei Freising ein Vorversuch für Dürnast angelegt.

3.2.1 Klima und Witterung

Der Charakter des Klimas an den Versuchsstandorten trägt kontinentale Züge. Es fallen in den Sommermonaten bedeutend mehr Niederschläge als in den Wintermonaten (Abb. 4 - 6, Anhang).

Die Orte gehören zwei verschiedenen Feuchtezonen an. Freising liegt in der mäßig feuchten Klimazone, Olching in der mäßig feuchten bis feuchten, während Erding an der Grenze zwischen beiden Zonen liegt (Klimakarte nach A. Hock, 1955 (122).

Tabelle 1:

Klimadaten der Versuchsstandorte für die Vegetationsperiode von Wintergetreide (Okt. bis Sept. 1971-1973)

Ort	Niederschlagsmenge (mm)			Mittlere Lufttemperatur (°C)		
	1931/60	1971/72	1972/73	1931/60	1971/72	1972/73
Olching	856	574	756	7,5	8,6	8,5
Erding	790	443	674	7,7	7,6	7,1
Freising	814	483	721	7,7	7,6	7,1

Die Klimadaten basieren auf den Messungen der Agrarmeteorologischen Forschungsstelle in Weihenstephan und den eigenen Messungen der Versuchsgüter.

Die Witterung des Jahres 71/72 ist durch ein Niederschlagsdefizit von etwa 300 mm gegenüber dem langjährigen Durchschnitt (1931/60) gekennzeichnet. Auch 72/73 fielen über 100 mm weniger Niederschläge. Die Jahresmittel der Temperaturen lag in Roggenstein um 1.1 °C und 1.0 °C über dem Durchschnitt, an den anderen Orten um 0.1 °C und 0.6 °C unter dem Durchschnitt (Tab. 1). Die Niederschlagsver-

teilung in den einzelnen Monaten ist im Anhang Abb. 4 - 6 ausführlich dargestellt.

3.2.2 Bodentyp und Bodenart

Die Versuchsorte haben verschiedene Bodentypen, die man für den südbayerischen Raum als repräsentativ ansehen kann, und die zum Teil auch in ihrer Typologie für große Flächen in Mitteleuropa charakteristisch sind (Tab. 2).

Tabelle 2:

Bodenart und Bodentyp der Versuchsstandorte

Ort	Bodenart	Bodentyp
Roggenstein	sL	Aueboden (Braunernde)
Frankendorf	tL	Parabraunerde
Dürnast	tL	Pseudogley-Ackerbraunerde

Im Anhang werden die Bodentypen näher beschrieben (Anhang, S. 153). Alle Böden zählen zu den Schluff- und Lehmböden und liegen in ihren Eigenschaften zwischen den durchlässigen, nährstoffarmen Sandböden und den meist an schlechter Durchlüftung leidenden aber nährstoffreichen Tonböden. Ihre Mittelstellung weist damit auf eine relativ gute Nährstoffversorgung bei gleichzeitig günstigem Bodengefüge hin.

3.2.3 Der ackerbauliche Wert der Standorte

Der ackerbauliche Wert schlägt sich in der Bodenwertzahl nieder, deren Höhe die Ertragsfähigkeit des Bodens beurteilt. Neben Bodenart, Bodentyp und Klimazone geht in ihr die Hanglage und Hangneigung ein. Nach der Bodenwertzahl (Tab. 3) ergibt sich folgende abnehmende Reihung der Standorte:

Frankendorf - Dürnast - Roggenstein

Tabelle 3:

Textur und organische Substanz der Ap-Horizonte und die Bodenwertzahl der Versuchsstandorte

Ort	Ton % < 2 µ	Schluff % 2-20 µ	f.Sand % 20-200 µ	Sand % >200 µ	org. Subst. (%)	Boden-wert-zahl
Roggenstein	24	21	36	19	2,13	51/54
Frankendorf	15	31	48	6	2,47	74/78
Dürnast	17	36	43	4	2,18	55/61

Für die Bearbeitung gibt die Korngrößenzusammensetzung (Textur) - speziell der Ton- und Sandgehalt - zusammen mit dem Anteil der organischen Substanz darüber Auskunft, ob ein Boden als schwer oder leicht bearbeitbar anzusprechen ist. So deutet der Sandgehalt darauf hin, daß der Boden von Roggenstein trotz höheren Tongehaltes zum Typ des leichteren Bodens gehört, während man in Frankendorf und Dürnast von einem mittelschweren Boden sprechen kann (Tab.3).

Für die Pflanze ist die Porenverteilung mit ihrem Einfluß auf den Luft- und Wasserhaushalt von größter Bedeutung. An Hand der pF-Kurven soll dieser Einfluß diskutiert werden (Abb.2). Das Porenvolumen ist die Summe der Porenanteile von Grob- , Mittel- und Feinporen. Es liegt an allen Standorten bei etwa 40 Vol.%. Durch lockernde Bearbeitungsmaßnahmen erhöht es sich um 5-10 Vol.% (gestrichelte Linie). Es werden vor allem die Grobporen vermehrt. In Roggenstein liegt der Anteil der Grobporen bei etwa 30 Vol.%, in Frankendorf bei etwa 20 Vol.% und in Dürnast bei 15 Vol.%. In den Grobporen verläuft die O_2-Diffusion zwischen Unterboden und Atmosphäre. Bei normalen Setzungsvorgängen sinkt der Anteil um etwa 5 Vol.%. Wenn man davon ausgeht, daß 10-15 Vol.% für eine ausreichende Durchlüftung notwendig sind (Baver,

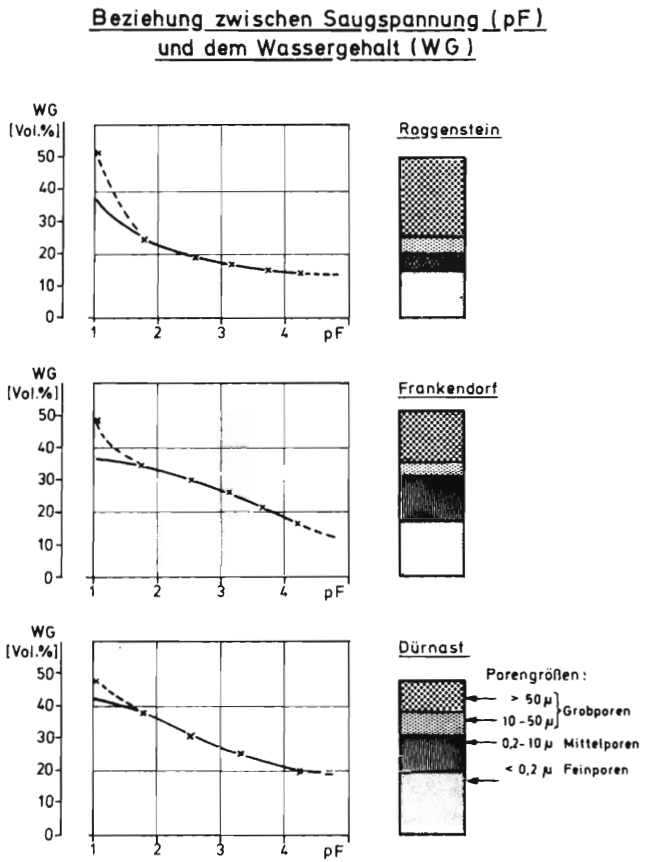

Abb. 2: pF-Kurven und Porenverteilung in den Ap-Horizonten der Versuchsstandorte.

1949 (12); Boguslawski, Lenz? 1960 (21); Boekel, 1963 (19)), dann besteht in Roggenstein keine Gefahr mangelnder Durchlüftung. In Frankendorf und Dürnast, deren natürlicher Grobporenanteil etwas mehr als 10 Vol% beträgt, besteht die Gefahr mangelnder O_2-Versorgung. Die Gefahr besteht umsomehr, als in Frankendorf die schluffreiche Parabraunerde eine geringe Stabilität hat, und in Dürnast die Verdichtungsanfälligkeit durch den Stau des Wassers im Unterboden der Pseudogley-Ackerbraunerde verursacht wird.

Betrachtet man den Anteil der Mittelporen (0,2 - 10 μ), in denen das pflanzenverfügbare Wasser gespeichert wird, dann haben Frankendorf und Dürnast einen um 8 bis 10 Vol% höheren Anteil im Bodengefüge als Roggenstein. Die Wasserversorgung der Pflanzen ist deshalb nur für den flachgründigen A-Horizont in Roggenstein ein größeres Problem, zumal hier ein kapillarer Wasseraufstieg aus dem kiesigen Unterboden nicht möglich ist (siehe Anlage, S.153).

3.3 Untersuchungsmethoden

Der Zerkleinerungseffekt von Bodenbearbeitungsgeräten und die Rückwirkungen auf das Bodengefüge läßt sich mit verschiedenen Methoden untersuchen. Folgende haben sich in der Vergangenheit als brauchbar erwiesen:

- Bodenwiderstandsmessung mit dem Penetrometer nach CULPIN, 1936 (27)
- Aggregatanalyse durch Absieben nach PUCHNER, 1911 (88) und
- Untersuchung des Bodengefüges mit Stechzylindern nach v. NITZSCH, 1938 (83); RICHARDS, 1943 (91); KMOCH, HANUS, 1965 (67).

3.3.1 Bodenwiderstandsmessung

Der Bodenwiderstand ist eine komplexe Größe des Bodenverbandes, in die der Wassergehalt, die Lagerungsdichte und die Textur, aber auch die innere Reibung des Bodens und der Reibungskoeffizient von Boden und Metall eingehen. Die ersten Versuche mit einer Drucksonde (Penetrometer) haben v.MEYENBURG, 1923 (76);HENIN, 1931 (58); CULPIN, 1936 (27) unternommen. Das Arbeitsprinzip beruht darauf, daß ein Stahlkegel unter gleichmäßigem Druck in den Boden getrieben wird. Zugleich werden die auftretenden Widerstände mechanisch mit einer Druckfeder gemessen und als Tiefenfunktion aufgezeichnet. BOGUSLAWSKI und LENZ, 1958 (20) haben in Anlehnung an FREI und KELLER, 1953 (46) die sogenannte Rammsonde entwickelt, die durch die Energie eines Gewichtes,das im freien Fall von bestimmter Höhe auf die Sonde schlug, in den Boden getrieben wird. Da sich die Rammsonde als sehr arbeitsaufwendig erwiesen hat, wurde am Institut für Landtechnik, Weihenstephan von STANZEL[1] ein Penetrometer nach dem Prinzip der Drucksonde nach CULPIN (1936) konstruiert, das den Bodenwiderstand nicht mechanisch, sondern elektronisch registriert.

Das Penetrometer ist handbetrieben (Abb. 3). Die Meßgrößen Kraft und Tiefe werden von Gebern in analoge elektrische

[1] STANZEL (1972), Penetrometer; Betriebsanleitung des Instituts für Landtechnik

Signale transformiert, die von einem Koordinatenschreiber aufgezeichnet werden. Die Dimensionen für den Eindringkegel und die Schubstange wurden nach der ASAE-Empfehlung R 313.1, Febr. 1971 (4) ausgelegt:

- Stahlkegel: Winkel 30 °, Basisfläche 1,29 cm^2 (Ø 12,83 mm)
- Schubstange: Durchmesser 10 mm, Länge 50 cm
- Eindringgeschwindigkeit: 3 cm/sec., das entspricht für die gegebene Übersetzung der Handkurbel 2 Umdrehungen/sec.

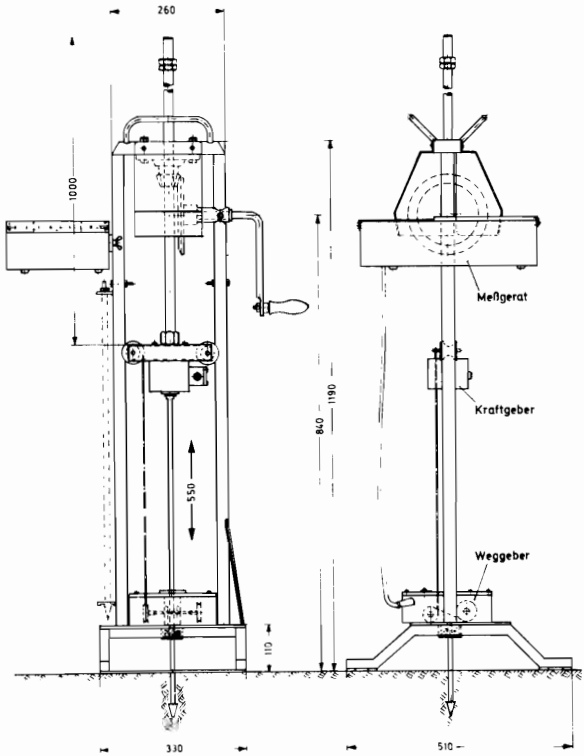

Abb. 3: Bauplan des Penetrometers.

Mit dem Penetrometer wird eine Kraft gemessen (K_{gem}), die sich aus zwei Komponenten zusammensetzt. Zunächst muß der Kegel den äußeren Widerstand, der durch die Reibung (R) Boden-Kegel hervorgerufen wird, überwinden, dann den inneren Widerstand (K), der durch die Kompr mierbarkeit des Bodens verursacht wird. Die gemessene Kraft ist demnach die Summe des äußeren und inneren Widerstandes.

$$K_{gem} = K + R$$

Wenn man der bisher allgemeinen Definition des Bodenwiderstandes (BW) folgt, ist diese gemessene Kraft der "Bodenwiderstand". Da bisweilen Kegel eingesetzt werden, die gleiche Öffnungswinkel aber eine unterschiedliche Basisfläche (F) besitzen, bezieht man die Kraft auf die Fläche (F). Daraus folgt:

$$BW = \frac{K_{gem}}{F} \quad (N/cm^2)$$

Bei den durchgeführten Messungen wurde ausschließlich der Kegel mit der Basisfläche 1,29 cm^2 verwendet.

Der Bodenwiderstand wird als Tiefenfunktion von einem Schreiber aufgezeichnet. Es wurden je Variante 8 - 10 Wiederholungen durchgeführt. Die Mittelwerte wurden aus den 8 - 10 Messungen für die Bodentiefen im Abstand von 5 cm berechnet. Manchmal ist es zweckmäßig, den Mittelwert des Bodenwiderstandes bei einer Änderung der Steigung in einer beliebigen Bodentiefe zu bestimmen, z.B. bei der Erfassung der Pflugtiefe in Abbildung 4.

Bei der Erfassung von Verdichtungshorizonten, die unter den Bearbeitungsgrenzen der Geräte entstehen, wurde eine Mittelwertbildung bei der Steigungsänderung der Kurven der willkürlichen Tiefenwahl im Abstand von 5 cm vorgezogen.

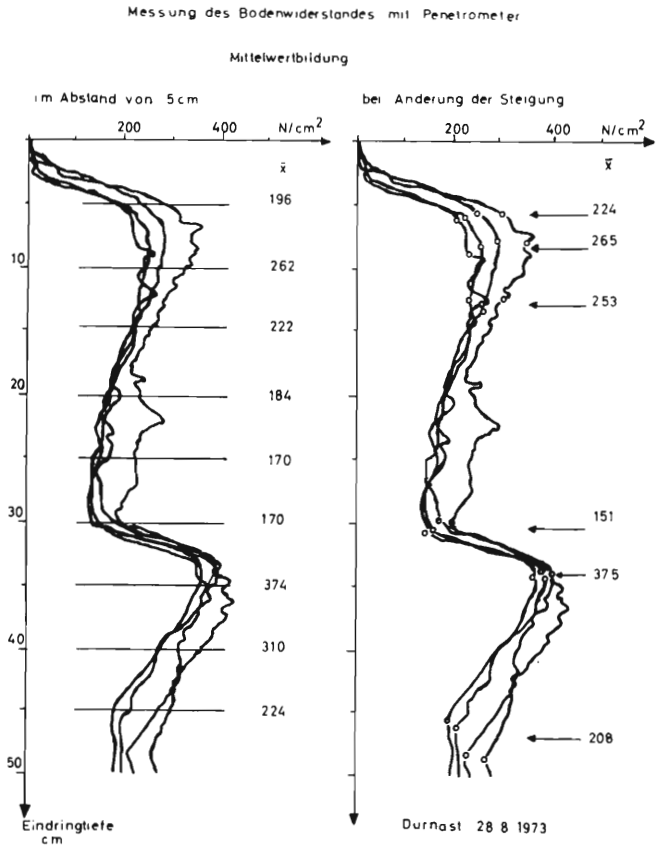

Abb. 4: Vier Bodenwiderstandsmessungen und die Mittelwertbildung im Tiefenabstand von 5 cm, bzw. bei Änderung der Kurvensteigung.

3.3.2 Aggregatanalyse

Die sogenannte Schollenanalye nach Puchner, 1911 (88), erfaßt das durch eine Bearbeitung verursachte Aggregatgemisch am besten. In ihren Grundzügen wurde sie beibehalten, geändert wurde die Vorbehandlung der Proben (de Boodt et al., 1961 (31)), die Sieblochzusammensetzung (Soehne, 1953 (103)) und die Auswertungsmethode (van Bavel, 1950 (15)).

Die Proben wurden in 6 - 8-facher Wiederholung sofort nach der Oberflächenbearbeitung genommen, indem man eine Plastikdose (Ø d = 9 cm, h = 10 cm) bis zur Bearbeitungstiefe in den Boden drückt und die gefüllte Dose mit einer kleinen Handschaufel aus dem Boden heraushebt. Anschließend wurden die Proben in einem geschlossenen Raum an der Luft getrocknet. Nach 14 Tagen etwa - der Wassergehalt sollte bei 8-10Gew% liegen - wurden die lufttrockenen Aggregate mit der Hand abgesiebt und gewogen. Hierzu wurde eine Siebkombination von 40 - 20 - 10 mm Lochdurchmesser und 5 - 3 - 2 mm Maschenweite (DIN 1171) verwendet.

Als Maß für die Aggregatgrößenverteilung wurde der Gewogene Mittlere Durchmesser (GMD) nach van BAVEL berechnet:

$$GMD = \frac{\sum (n_i d_i)}{\sum n_i} \quad (mm)$$

n_i = Gewicht der Aggregatgrößenklasse i

d_i = Klassenmitte der Aggregatgrößenklasse i

3.3.3 Untersuchungen des Bodengefüges

Die von Luft und Wasser gefüllten Hohlräume des Bodens ergeben das Porenvolumen, das mit Hilfe der Stechzylindermethode nach von Nitzsch, 1938 (83) ermittelt wurde. Lange Zeit galt das Porenvolumen als bestes Beurteilungskriterium für die Lagerungsdichte des Bodengefüges, ehe es Richards, 1943 (91) gelang, die verschiedenen Porengrößenanteile des Porenvolumens zu messen. Als Ergänzung zur Porengrößenverteilung ist die Porenkontinuität zu betrachten, die man mit Hilfe der Permeabilitätsmessung nach Kmoch, Hanus, 1965 (68) bestimmt. Es war möglich, daß im 100 cm^3-Stechzylinder das Porenvolumen, die Porengrößenverteilung und Porenkontinuität nacheinander ohne Zerstörung der Probe ermittelt werden konnte. Hierzu wurden Stechzylinderproben in 10-facher Wiederholung genommen und nach folgendem Ablauf untersucht:

1. LG: Luftgehalt in Vol.%

   Er wurde direkt mit dem Pyknometer nach Langer (Firma Gerhardt) gemessen.

2. WG: Wassergehalt in Vol.%

   Er errechnet sich aus der Gleichung:

$$WG = (100-LG) - \frac{GBW - (100 - LG)}{\varrho - 1}$$

   GBW: Gewicht Bodensubstanz + Bodenwasser

   ϱ : Spezifisches Gewicht der Bodensubstanz; bei einem Gehalt an org. Substanz von etwa 2 % wurde für den Ap-Horizont aller Standorte ein spez. Gewicht von 2,60, für tiefere Bodenschichten ein ϱ = 2,65 angenommen.

3. PV: Porenvolumen in Vol%

Es ergibt sich aus:

PV = LG + WG

4. PGV: Porengrößenanteile in Vol%

Sie wurden mit Hilfe des Drucktopfes und keramischer Platten nach RICHARDS, 1943 (91) ermittelt.

Poren $< 50\mu$ = WG bei Wasserspannung 60 cm WS

Poren $< 10\mu$ = WG bei Wasserspannung 300cm WS

Poren > 50 und > 10 werden aus der Differenz zum PV errechnet.

5. k_a: Permeabilitätskoeffizient für Luft (μ^2).

Die Permeabilität wurde nach dem Einstellen des Wassergehaltes bei einer Wasserspannung von 60 cm WS gemessen. Hierzu wurde das Permeameter von KMOCH, HANUS, 1965 (68) verwendet. Der Koeffizient errechnet sich aus der Gleichung:

$$k_a = \frac{V \cdot \eta}{p \cdot t} \cdot \frac{L}{A}$$

Konstante Größe sind:

V = Volumen der durchgeströmten Luft	(cm^3)
p = Druck	(dyn/cm^2)
L = Länge der Stechzylinderprobe	(cm)
A = Fläche der Stechzylinderprobe	(cm^2)
η = Viskosität der Luft	($dyn\ sec/cm^2$)

die zu messene Variable ist:

t = Durchströmzeit der Luft	(sec).

Zur Einschränkung des Versuchsfehlers wurden die Stechzylinderproben vor den Permeabilitätsmessungen am Rand verdichtet.
Da die Permeabilitätskoeffizienten nicht normal verteilt sind - die Streubreite innerhalb einer Gruppe von mehreren Wiederholungen kann mehr als 2 Potenzen betragen -, hat sich für die Auswertung das Geometrische Mittel durchgesetzt (KMOCH, HANUS,

1965 (68); Hartge, 1967 (57); Baumgart, 1967 (14)). Die Koeffizienten werden hierzu logarithmisch transformiert und aus den Logarithmen der Mittelwert gebildet. Die Abkürzung der Koeffizienten ist dann folgende:

$$\lg \; k_a = p \; k_a$$

Die Dimension von $p\ k_a$ ist ($\lg \mu^2$). In der Diskussion wurde nur der Logarithmus von k_a verwandt ohne Angabe der Dimension. Als Vergleichsmaßstab wurde der Klassifizierungsvorschlag von Tabelle 4 herangezogen.

Tabelle 4:
Klassifizierung der Luftpermeabilität nach Kmoch, Hanus, 1965(68)

	$p\ k_a$ ($\lg \mu^2$)	Klasse
1.	< 1.0	sehr gering
2.	1.00 bis 1.33	gering
3.	1.33 bis 1.67	mittel
4.	1.67 bis 2.00	gut
5.	>2.00	sehr gut

3.4 Statistische Auswertungsmethoden

Die Untersuchungen wurden so durchgeführt, daß eine varianzanalytische Berechnung mit gleicher Wiederholungsanzahl möglich war. Da der Effekt verschiedener Geräte in bestimmten Jahren untersucht wurde, entspricht die Varianzanalyse dem Modell I nach Eisenhart, 1951 (36) mit festen Effekten. Der Mittelwertvergleich erfolgte mit Hilfe des multiplen t-Tests. Für einen mehrfaktoriellen Vergleich standen sich somit folgende vier Faktoren gegenüber:

1. Faktor: Standorte
- Roggenstein,
- Dürnast,
- (Frankendorf)

2. Faktor: Zeitpunkt der Probenahme für 1972 u. 1973
   - März,
   - Juni,
   - August.

3. Faktor: Grundbodenbearbeitung
   - Scharpflug,
   - Kreiselpflug.

4. Faktor: Oberflächenbearbeitung
   - konv. Kombination,
   - Kreiselegge,
   - Feingrubber.

Diese Faktorenkombination traf für die Standardversuche zu. Für die ergänzenden Versuche (Effekt der Rüttelegge und Fräsen) mußte die Varianzanalyse für jeden Ort getrennt durchgeführt werden, da eine gleiche Besetzung der Gruppen nicht möglich war.

Das oben aufgeführte Schema wurde sowohl auf die Ergebnisse der Stechzylindermethode als auch auf die Bodenwiderstandsmessungen angewandt. Für die Aggregatgrößenverteilung in Roggenstein bzw. Dürnast konnte beim Faktor (4) die Anzahl der Geräte durch die Rüttelegge bzw. Fräse ergänzt werden.

Die Grenzdifferenzen wurden für eine Fehlerwahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\ \%$ berechnet. Bei dem Vergleich verschiedener Gruppen in der Varianzanalyse wurden signifikant verschiedenc Gruppen mit verschiedenen kleinen Buchstaben (z.B. a, ab, b) gekennzeichnet. Eine Gruppe mit zwei Buchstaben (ab) gehört überlappend den zwei angrenzenden Gruppen (a, b) an.

Nach der Varianzanalyse wurde versucht, die Einflußgrößen für Aggregatgrößenverteilung, Bodenwiderstand und andere bodenphysikalischen Eigenschaften in einer multiplen Regressionsanalyse herauszuarbeiten. Hierzu wurde ein EDV-Programm der Aufbauenden Multiplen Regression verwendet. Korrelations- und Regressionskoeffizient wurden auf ihre Signifikanz geprüft. Bei einer Fehler-

wahrscheinlichkeit von α = 5% ist der signifikant (x) abgesichert, bei einer von α = 1% hochsignifikant (xx).

Zur Anwendung kamen folgende Rechenprogramme der EDV:

Varianzanalyse:	installiert von der Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau.
Aufbauende Regression:	Version des IBM - Klasse 3 - Programmes mit Änderungen des Instituts für Landtechnik, Weihenstephan.
Stechzylinder-Auswertung:	Dr. Hanus, Mangstl Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Weihenstephan.

4. Ergebnisse

4.1 Aussagewert der Untersuchungsmethoden

Der Aussagewert einer Methode wird dadurch bestimmt, wie genau Unterschiede zwischen den Varianten erfaßt werden. Die Varianzanalyse bietet nun die Möglichkeit, durch das Verhältnis der Mittleren Quadrate (MQ) von Einflußfaktor und Fehler - meist als F-Test bezeichnet - bei den einzelnen Untersuchungsmethoden den Aussagewert für diesen Faktor zu wichten.

Hierzu wurde für die Aggregatgrößenverteilung (GMD) nach der Bearbeitung, für den Bodenwiderstand und für einige physikalische Bodeneigenschaften der F-Wert berechnet. Neben den Einflußfaktoren wurden deren Wechselwirkungen des 1. Grades mitberücksichtigt, während die Wechselwirkungen höheren Grades übergangen wurden. Als Einflußfaktoren gingen die Standorte, die Zeitpunkte der Probenahme bzw. der Bearbeitung (GMD), die Grundbodenbearbeitung und die Oberflächenbearbeitung ein. Der Einfluß dieser vier Faktoren auf den Aufbau des Bodengefüges in der Krume bis zu einer Tiefe von 10 cm ist in Tabelle 5 dargestellt.

Zunächst zeigt sich, daß die Standorte und die Zeitpunkte auf alle erfaßten Bodeneigenschaften den größten Einfluß ausüben, da deren F-Wert weit über der Signifikanzschwelle liegt, während die F-Werte der beiden anderen Faktoren gerade noch signifikant sind. Sie haben sogar nur auf wenige Bodeneigenschaften einen signifikanten Einfluß. Eine größere Variabilität durch die Grundbodenbearbeitung - variiert durch den Schar- und Kreiselpflug - tritt nur beim Porenvolumen, bei den kapillaren Poren ($\varnothing < 10\ \mu$) und bei den engen Grobporen ($\varnothing$ 10/50 μ) auf. Die Variabilität der Oberflächenbearbeitung - variiert durch konventionelle Bestellung, Feingrubber und Kreiselegge - wird sehr stark bei der Aggregatgrößenvertei-

Tabelle 5:

Verhältnis der Mittleren Quadrate (MQ) von Einflußfaktor und Fehler (F-Test) bei verschiedenen Bodeneigenschaften

	GMD	BW	WG	LG	PV	P>50	P>10	P<50	P<10	P 10/50	pka
Standort (S)	379,0	418,8	688,1	754,9	43,5	679,1	735,5	529,2	633,6	34,1	304,5
Zeitpunkt d. Probenahme, Bearbeitung (Z)	21,5	149,4	396,4	432,4	26,1	47,0	74,8	5,8	21,8	68,3	93,7
Grundboden-bearbeitung (G)	0,3ns	1,1ns	3,0ns	0,7ns	5,7	1,8ns	0,2ns	1,1ns	9,9	60,4	0,0ns
Oberflächen-bearbeitung (O)	24,0	1,8ns	1,9ns	2,2ns	7,7	2,9ns	2,1ns	1,1ns	2,0ns	1,5ns	2,8ns
Wechselwirkung 1.Grades											
S x Z	47,7	493,8	86,8	170,9	52,8	112,1	135,2	25,3	41,3	26,1	53,0d
S x G	9,4	1,0ns	6,2	5,6	2,6ns	3,0ns	3,3ns	7,3	2,9ns	1,0ns	0,8ns
S x O	4,3ns	2,7ns	4,8	5,9	3,8ns	5,5	6,0	2,1ns	13,4	1,0ns	6,1
Z x G	0,0ns	0,6ns	4,9	1,6ns	0,4ns	5,6	7,0	9,8	3,3ns	4,8	1,5ns
Z x O	1,0ns	3,8ns	4,8	5,6	1,4ns	3,0ns	3,8	2,5ns	5,4	2,9ns	2,8ns
G x O	1,3ns	7,7	2,7ns	5,2	1,1ns	3,8ns	7,7	1,8ns	2,6ns	13,8	1,4ns

GMD: Gewogener Mittlerer Durchmesser der Aggregatgrößenverteilung

BW: Bodenwiderstand

WG: Wassergehalt

LG: Luftgehalt

PV: Porenvolumen

P>10 : Poren > 10 μ

P<10 : Poren < 10 μ

P>50 : Poren > 50 μ

P<50 : Poren < 50 μ

P10/50 : Poren 10-50μ

pka: Permeabilitätskoeffizient für Luft

lung und geringfügig beim Porenvolumen registriert.

Alle anderen Merkmale lassen den Einfluß von Grund- und Oberflächenbearbeitung nicht erkennen. Das heißt aber nicht, daß die Geräte der Bodenbearbeitung keinen Einfluß auf die Bodeneigenschaften haben, sondern es deutet sich hier bereits an, daß der Unterschied zwischen den einzelnen Geräten sehr gering ist.

Auch in der Wechselwirkung spiegelt sich das gleiche Bild wieder. Nur die F-Werte, bei denen der Standort und der Zeitpunkt miteingehen, haben einen höheren Wert. Für die Untersuchungen sind die Wechselwirkungen zwischen dem Zeitpunkt der Probenahme und den Bestellgeräten (Z x O) interessant. Mit der Signifikanz dieser F-Werte kann die Frage beantwortet werden, ob sich das Bodengefüge unter dem Einfluß der Witterung zwischen den Probenahmen auf den einzelnen Bearbeitungsparzellen unterschiedlich verändert. Beim Luft- und Wassergehalt, bei den Poren $> 10\mu$ und Poren $< 10\mu$ treten signifikante F-Werte auf, die jedoch im Gegensatz zu Einzelwirkungen die Signifikanzschwelle gerade noch überschreiten (Tab.5). Man kann daher annehmen, daß die Bodeneigenschaften nach den einzelnen Bestellverfahren unter dem Einfluß der Witterung einer gleichen Dynamik unterworfen sind.

Um den Effekt der Bestellgeräte zur Oberflächenbearbeitung zu erfassen, empfiehlt es sich, die Aggregatgrößenverteilung intensiver zu diskutieren, während bei den anderen eingesetzten Methoden auf Grund der geringen Variabilität kaum ein signifikanter Unterschied zwischen den Bestellgeräten in der Krume bis zu 10 cm zu erwarten ist. Auf Grund der Aussagekraft der Untersuchungsmethoden werden zunächst die Ergebnisse des Bodenwiderstandes gebracht, die einen groben Einblick in das Bodengefüge und den Einfluß von Bearbeitungsmaßnahmen geben. Dann wird die Zerkleinerungsintensität der einzelnen Bestellgeräte untersucht, um die Ausgangssituation für das Bodengefüge zu erfassen, und zuletzt werden als Folge der Zer-

kleinerung die physikalischen Bodeneigenschaften als drittes Untersuchungsergebnis dargestellt.

4.2 Der Bodenwiderstand

Obwohl die Bodenwiderstandsmessungen in den gepflügten Böden kaum Unterschiede zwischen den Bearbeitungsgeräten aufzeigten, wurden dennoch während der Vegetationsperiode des öfteren Messungen gemacht. Für diese Messungen sprach die Tatsache, daß der Bodenwiderstand relativ einfach zu ermitteln war und daß man sofort einen groben Einblick in das Bodengefüge bis zu einer Tiefe von 50 cm gewann. Zugleich wurden meist Stechzylinderproben genommen, sodaß sich die Möglichkeit bot ohne zusätzlichen Arbeitsaufwand die Abhängigkeit des Bodenwiderstandes von einigen physikalischen Bodeneigenschaften zu untersuchen.

4.2.1 Einfluß physikalischer Bodeneigenschaften auf den Bodenwiderstand

Eine Woche vor und nach einer Stechzylinderprobenahme wurden mehrmals Penetrometermessungen durchgeführt und gleichzeitig aus mehreren Tiefen eine Mischprobe zur Wassergehaltsbestimmung genommen. Da man annehmen kann, daß sich das Bodengefüge innerhalb der zwei Wochen nicht stark verändert, ist es möglich, den Bodenwiderstand mit den aus der Stechzylinderprobe gewonnenen Daten und dem zusätzlich ermittelten Wassergehalt zu korrelieren. Die Korrelationskoeffizienten zwischen einigen wichtigen Bodeneigenschaften und dem Bodenwiderstand sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6:

Beziehung zwischen dem Bodenwiderstand (BW) und physikalischen Bodeneigenschaften

Korrelationsmatrix

Standort: Roggenstein (n = 162)

	BW	rt	Poren >10 µ	Poren <10 µ	WG Gew.%
BW	1.00				
rt	0.55	1.00			
Poren > 10 µ	-0.50	-0.92	1.00		
Poren < 10 µ	0.37	0.62	-0.87	1.00	
WG Gew.%	-0.46	0.10ns	-0.07ns	-0.01ns	1.00

rt: Lagerungsdichte
WG: Wassergehalt
ns: nicht signifikant α = 1 %

Der Bodenwiderstand hat zu allen physikalischen Bodeneigenschaften eine statistisch abgesicherte Beziehung, die gegenüber dem Anteil der Poren >10µ und dem Wassergehalt negativ ist, gegenüber der Lagerungsdichte und den Poren <10µ positiv. Das bedeutet, daß der Bodenwiderstand mit Ansteigen der Lagerungsdichte und des Anteils der Poren <10µ größer wird, aber mit Zunahme des Wassergehaltes und des Anteils der Poren >10µ zurückgeht. Für die Standorte Frankendorf und Dürnast ergeben sich die gleichen Beziehungen (Anhang, Tab. 1).

Daß die Korrelation zwischen dem Wassergehalt und dem Bodenwiderstand nicht höher ist, liegt an der nicht-linearen Beziehung. So fällt der Bodenwiderstand exponentiell mit steigendem Wassergehalt (Abb. 5). Die exponentielle Änderung wird umso stärker, je höher die Lagerungsdichte ist. Es zeigt sich auch in Abbildung 5, daß mit der Lagerungsdichte der Bodenwiderstand exponentiell

ansteigt. Für den untersuchten Bereich trifft zwar eine lineare Beziehung zwischen diesen beiden Größen ebenfalls zu, aber bei Unterschreiten der Lagerungsdichte von rt = 1,2 (g/cm^3) würde bei einer Linearität ein negativer Wert für den Bodenwiderstand auftreten. In der Natur strebt aber der Bodenwiderstand mit abnehmender Lagerungsdichte dem Wert Null zu, so daß eine exponentielle Funktion diese Beziehung besser beschreibt.

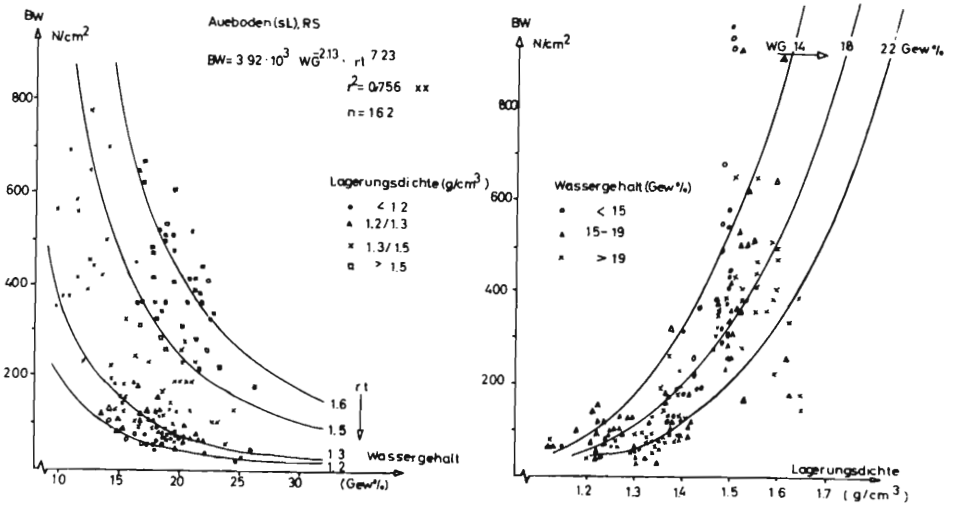

Abb. 5: Beziehungen zwischen dem Bodenwiderstand und dem wassergehalt bzw. der Lagerungsdichte.

Über eine Multiple Regression wurde die Beziehung zwischen dem Bodenwiderstand, der Lagerungsdichte und dem Wassergehalt in einer Schätzfunktion erfaßt. Hierzu wurden die Daten logarithmiert. Für die drei Versuchsstandorte ergaben sich folgende Gleichungen:

Roggenstein: $\log BW = 3.59 - 2.13 \log WG + 7.^{23} \log rt$ (r^2 =0.76, n=162)
Frankendorf: $\log BW = 3.43 - 2.13 \log WG + 9.88 \log rt$ (r^2 =0.79, n=112)
Dürnast: $\log BW = 3.39 - 1.92 \log WG + 7.24 \log rt$ (r^2 =0.72, n= 88)

Die numerische Form der Funktionen ergibt folgende Gleichungen:

Roggenstein: $BW = 3.92 \cdot 10^3 \cdot WG^{-2.13} \cdot rt^{7.23}$
Frankendorf: $BW = 2.71 \cdot 10^3 \cdot WG^{-2.13} \cdot rt^{9.88}$
Dürnast: $BW = 2.48 \cdot 10^3 \cdot WG^{-1.93} \cdot rt^{7.24}$

Die BW-Funktion von Dürnast muß mit gewissen Einschränkungen betrachtet werden, da hier die Anzahl der Wiederholungen (n = 88) gegenüber der Anzahl der anderen Standorte abfällt. Vor allem die Spannbreite des Wassergehaltes ist in Dürnast mit 18 - 27 Gew.% gegenüber 10 - 25 Gew.% in Roggenstein und 15 - 30 Gew.% in Frankendorf sehr viel schmaler. In den folgenden Überlegungen wird daher Dürnast ausgeklammert.

Diese Schätzfunktionen haben ein hohes Bestimmtheitsmaß. Sie erklären 70 - 80 % der Abhängigkeit des Bodenwiderstandes von diesen beiden Bodeneigenschaften. Zur Lagerungsdichte besteht eine Beziehung mit positiven Exponenten, zum Wassergehalt mit negativen, d.h., mit steigender Lagerungsdichte wächst der Bodenwiderstand exponentiell, umgekehrt sinkt er exponentiell mit steigendem Wassergehalt.

Es fällt auf, daß die negativen Exponenten des Wassergehaltes für alle Standorte bei etwa 2.0 liegen, d.h., daß der Wassergehalt den Bodenwiderstand der Standorte in etwa gleich verändert. Sucht man nach der Ursache, dann muß man die Beziehung zwischen dem

Wassergehalt und der durch die Kapillarkräfte hervorgerufenen Bindungsintensität des Bodens berücksichtigen, denn mit dem Rückgang des Wassergehaltes steigt die Wasserbindungsintensität exponentiell an (pF-Kurve). Je trockener nun ein tonhaltiger Boden wird, desto stärker wirken die Kapillarkräfte, die die Bodenteilchen zusammenhalten, und desto mehr Kraft muß aufgewendet werden, um den Kegel des Penetrometers in den Boden zu drücken. Wenn man die pF-Kurve und die Bodenwiderstandskurve gegenüberstellt, dann fällt die große Ähnlichkeit der Kurven auf. Es bietet sich an, von der pF-Kurve Schlußfolgerungen auf die Bodenwiderstandskurve zu ziehen.

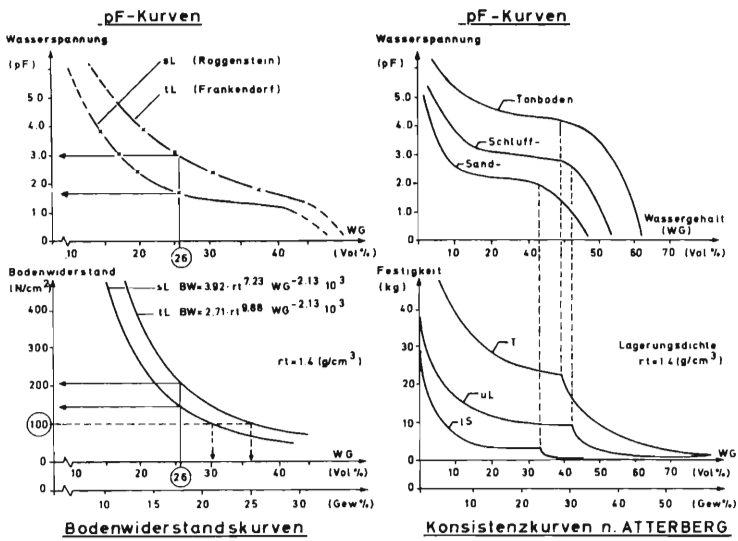

Abb. 6: Vergleich zwischen pF-Kurven und den Bodenwiderstandskurven.

Folgende Gemeinsamkeiten lassen sich bei dem Vergleich feststellen:

Bei einem Wassergehalt von 26 Vol% wird das Wasser in dem sandigen Lehm von Roggenstein mit einer Wasserspannung von pF = 1,8 gebunden, im tonigen Lehm von Frankendorf dagegen mit einem pF-Wert von 3,0. Der Bodenwiderstand verläuft parallel zum pF-Wert. Im sandigen Lehm liegt er bei einem Wassergehalt von 26 Vol% bei 145 N/cm^2, im tonigen Lehm bei 205 N/cm^2. Je höher der pF-Wert bei gleichem Wassergehalt ist, desto höher ist auch der Bodenwiderstand. Mit Hilfe dieser beiden Böden läßt sich die Beziehung zwischen pF und Bodenwiderstand nur andeuten, erst die Untersuchung einer größeren Anzahl von Böden läßt eine statistisch absicherbare Verrechnung zu.

Die Beziehung zwischen pF-Wert und Bodenwiderstand eröffnet eine interessante Deutung eines Ergebnisses, das ATTERBERG, 1914 (6) gefunden hat. Atterberg hat sogenannte Konsistenzkurven oder Festigkeitskurven aufgestellt, die in etwa den Bodenwiderstand kurven entsprechen. Auffallend war bei jenen Kurven die Unterteilung in zwei Kurvenabschnitte. Diese Unterteilung, die als Knie der Konsistenzkurven (Abb. 6) zum Ausdruck kam, konnte bisher nicht erklärt werden. Mit Hilfe der pF-Kurve ließe sich das Knie der Konsistenzkurven erklären. In Abbildung 6 sind oberhalb von den Konsistenzkurven Atterbergs die für die Bodenart charakteristischen pF-Kurven in angenäherter Form aufgezeichnet worden. Sobald bei abnehmendem Wassergehalt die pF-Kurve nach starkem Anstieg abflacht, ändert sich auch der exponentielle Verlauf der Konsistenzkurve. Erst bei erneuter Zunahme des pF-Wertes steigt ebenfalls die Konsistenz an.

Daß bei den Bodenwiderstandskurven der Versuchsböden dieses Knie nicht in Erscheinung trat, lag daran, daß die pF-Kurven in dem

untersuchten Wassergehaltsbereich einen kontinuierlichen Verlauf hatten.

Auf Grund dieser Zusammenhänge ist mit abnehmendem Wassergehalt ein exponentieller Anstieg des Bodenwiderstandes zu erwarten. Daß in den Schätzfunktionen die Exponenten des Wassergehaltes sich nicht unterscheiden, liegt an dem nahezu parallelen Verlauf der pF-Kurven (Abb. 6).

In den unterschiedlichen Exponenten der Lagerungsdichte äußert sich die Porenverteilung der beiden Böden. So hat der sandige Lehm von Roggenstein einen größeren Grobporenanteil als der tonige Lehm von Frankendorf. Je höher aber bei gleicher Lagerungsdichte (≙Porenvolumen) der Grobporenanteil ist, desto leichter läßt sich beim Eindringen des Penetrometerkegels das angrenzende Porenvolumen komprimieren. Daraus ergibt sich, daß der sandige Lehm einen Exponenten von 7,23 und der tonige Lehm einen Exponenten von 9,88 für die Lagerungsdichte hat.

Eine exponentielle Beziehung zwischen Bodenwiderstand und Wassergehalt haben auch Lenz und Boguslawski 1958 (72) beobachtet. Sie konnten ebenso für die Beziehung zwischen Lagerungsdichte und Bodenwiderstand eine nichtlineare Funktion feststellen. Mirreh und Ketcheson, 1972 (78) berechneten eine parabolische Beziehung zwischen Bodenwiderstand und Lagerungsdichte, dessen Minimum bei einer Lagerungsdichte von 1.0 g/cm^3 liegt. Für den untersuchten Bereich erfaßt eine Parabel diese Beziehung sehr gut. Wenn aber die Lagerungsdichte unter 1.0 g/cm^3 fällt, entspricht die Parabel nicht mehr dem tatsächlichen Verlauf, da der Bodenwiderstand mit sinkender Lagerungsdichte dem Wert Null zustrebt. Die exponentielle Form der Beziehung erfaßt die natürliche Beziehung besser.

Mit Hilfe der Bodenwiderstandsfunktionen läßt sich relativ einfach die Lagerungsdichte bei gegebenem Bodenwiderstand und Wasser-

gehalt berechnen. Es ergaben sich aber Schwierigkeiten mit der großen Streuung des Bodenwiderstandes. Die Streuung des Bodenwiderstandes schwankte zwischen 10 und 300 N/cm^2. Vor allem bei trockenem Bodenzustand und hoher Lagerungsdichte ($>1,5$ g/cm^3)waren die Streuungen sehr groß. Dies ist verständlich, wenn man weiß, daß einerseits in diesen Bereichen eine geringe Änderung des Wassergehaltes oder der Lagerungsdichte eine große Zu- oder Abnahme des Bodenwiderstandes verursachen, andererseits die Heterogenität des Bodens sehr groß ist. Schwankungen des Wassergehaltes von 2 % und der Lagerungsdichte um 0,5 (g/cm^3) sind keine Ausnahme. Für den praktischen Einsatz empfiehlt es sich zur Vermeidung allzu großer Streuungen, die Messungen bei mittleren Bodenfeuchten durchzuführen.

4.2.2 Die Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf den Bodenwiderstand

Auch wenn die Bodenwiderstandsmessungen keine Ergebnisse liefern, die eine pflanzenbauliche Beurteilung zulassen, so erhält man dennoch einen groben Einblick in das Bodengefüge. Am Verlauf der Bodenwiderstandskurven kann man bis zu einer Tiefe von 50 cm die Lockerungs- und Verdichtungsauswirkungen der Bodenbearbeitungsgeräte ablesen. In Abbildung 7 sind zwei typische Bodenwiderstandskurven einer Ackerkrume nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung aufgezeichnet.

Die eine Parzelle war vor dem Fräsen gepflügt worden (links), die andere blieb ungepflügt (rechts). Auf beiden Parzellen lassen sich die Kurven in drei Tiefenabschnitte gliedern. Bis 10 cm nahm der Bodenwiderstand kontinuierlich zu, zwischen 10 und 30 cm blieb er konstant oder ging etwas zurück, und bei 30 cm erhöhte er sich sprunghaft, um sich in tieferen Schichten kaum noch zu verändern.

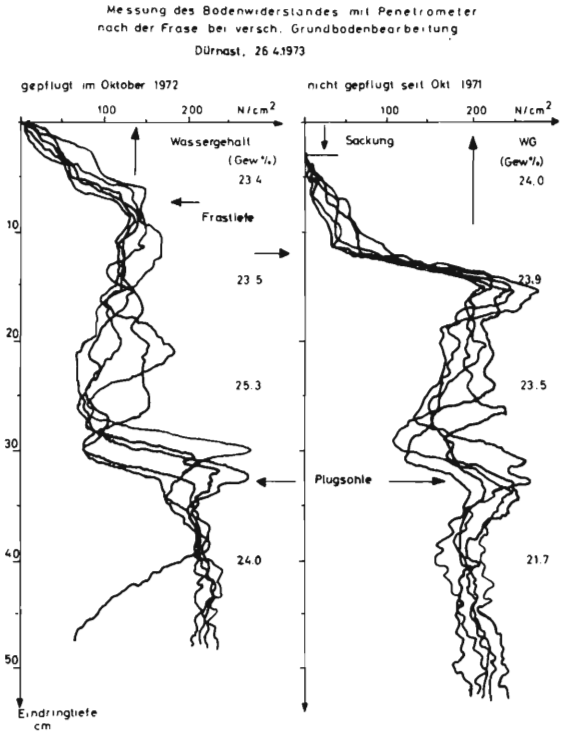

Abb. 7: Verdichtungshorizonte unter den Bearbeitungsgrenzen von Scharpflug und Fräse

Der plötzliche Anstieg des Bodenwiderstandes in 30 cm Tiefe zeigt die Bearbeitungsgrenze des Pfluges. Zwischen 30 und 35 cm hat die Bodenwiderstandkurve einen Gipfel. Diese Verdichtungsschicht ist die sogenannte Pflugsohle. Auch auf der Parzelle, die seit 1 1/2 Jahren nicht gepflügt worden war, ist der krasse Übergang zwischen bearbeiteter Krume und unbearbeitetem Unterboden noch deutlich zu erkennen, d.h. die Pflugsohle, die sich im Laufe der Jahre gebildet hatte, bleibt zumindest in den ersten beiden Jahren nach einem Pflugverzicht erhalten.

Beim Fräsen bildete sich ähnlich wie beim Pflügen ein Verdichtungshorizont unter der Bearbeitungsgrenze. Ist dieser Horizont auf der gepflügten Parzelle nur andeutungsweise vorhanden, so ist nach zweimaligem Fräsen ohne Pfluglockerung eine sehr scharfe Grenze zwischen gefrästem und ungefrästem Krumenteil zu beobachten. Der Bodenwiderstand der Frässohle erreichte mit 200 - 250 N/cm^2 den gleichen Wert wie in der Pflugsohle. Der Verzicht auf die Pfluglockerung (Abb. 7, rechts) führte zu einer Erhöhung des Bodenwiderstandes im mittleren Krumenraum (15 - 30 cm). Da der Wassergehalt in dem Bereich zwischen 23 und 25 Gew.% keinen großen Einfluß auf den Bodenwiderstand ausübt, kann die Zunahme des Bodenwiderstandes auf die größere Lagerungsdichte zurückgeführt werden. Auch die Sackung der Krume von etwa 3 cm weist auf eine Dichtlagerung hin.

Die Lockerung durch das Fräsen ist an dem geringeren Bodenwiderstand im oberen Krumenraum zu erkennen. Wenn man nun den Einfluß der Bestellgeräte nach vorausgegangener Pfluglockerung auf den Bodenwiderstand in verschiedenen Tiefen untersucht (Tab. 7), läßt sich nur einmal eine differenzierende Wirkung der Bestellgeräte feststellen. Und zwar war nach dem konventionellen Bearbeitungsverfahren in der Bodentiefe von 10 - 20 cm ein höherer Bodenwiderstand von 171 gegenüber 140 und 129 N/cm^2. In der Tiefe von 0 - 10 cm und in der Pflugsohle (25/30 cm) war der Bodenwiderstand gleich.

Tabelle 7: Einfluß der Bestellgeräte auf den Bodenwiderstand (N/cm^2) in verschiedenen Tiefen (Roggenstein, 1972; nach Schar- und Kreiselpflug). $GD_{5\%}$ = 26 N/cm^2

Bodentiefe(cm)	konv. Kombination	Kreiselegge	Feingrubber
0 - 10	58 a	66 a	59 a
10 - 20	171 a	140 b	129 b
25 - 30	436 a	450 a	459 a
> 40	316 a	349 b	350 b

Umgerechnet auf die Lagerungsdichte ergab sich im Durchschnitt von vier Meßterminen auf den konventionell bestellten Parzellen in der Tiefe von 15 cm eine Dichte von 1,45 gegenüber 1,35 g/cm^3 auf den anderen Parzellen. Zurückzuführen ist die höhere Lagerungsdichte auf das mehrmalige Befahren zur Saatbettbereitung. Bodenwiderstandsmessungen zeigten nämlich unter der Radspur eines 50 PS-Schleppers (ca. 1,8 t) eine Kompression der gepflügten Krume von 6 cm. Die Verdichtung hatte direkt unter der Spur in einer Tiefe von 6 cm ihr Maximum, das sich kontinuierlich verminderte. In einer Tiefe von 20 cm ist ein höherer Bodenwiderstand durch die Spurverdichtung nicht mehr festzustellen (Abb. 8).

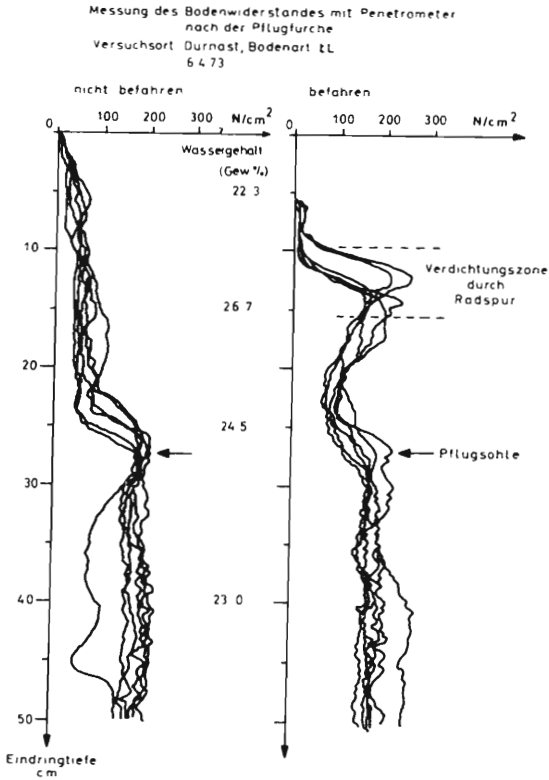

Abb. 8: Verdichtung durch ein Schlepperrad.

Wenn auch der Bodenwiderstand für eine differenziertere Untersuchung des Bodengefüges ungeeignet ist, so gibt er dennoch einen guten Einblick in die strukturellen Verhältnisse einer Ackerkrume. Bearbeitungsgrenzen oder Verdichtungshorizonte, ausgelöst durch Bearbeitungsmaßnahmen, lassen sich sehr exakt feststellen.

Für pflanzenbauliche Aspekte müssen zur Beurteilung des Bodengefüges aussagekräftigere Kriterien wie die Porengrößenverteilung und die Durchlässigkeit des Bodens herangezogen werden. Die arbeitsaufwendigen Stechzylinderuntersuchungen lassen sich durch die Bodenwiderstandsmessungen niemals ersetzen. Ehe aber die Ergebnisse der Stechzylinderuntersuchung gebracht werden, wird der Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte dargestellt, da die zerkleinerten Bodenaggregate durch ihre Größenverteilung die Grundlage für den Aufbau des Bodengefüges sind.

4.3 Der Zerkleinerungseffekt der Minimalbestellgeräte

Durch Absieben einer Bodenprobe konnte der Bearbeitungseffekt eines Bestellgerätes erfaßt werden. Als Beurteilungskriterium wurde der Gewogene Mittlere Durchmesser (GMD) berechnet. Je größer nun der GMD ist, desto geringer ist die Zerkleinerung durch ein Gerät. Zur leichteren Interpretation der zerkleinernden Wirkung eines Gerätes wurde aus dem reziproken Wert des GMD der Zerkleinerungsgrad (ZG) gebildet:

$$ZG = \frac{100}{GMD} \quad (1/mm).$$

Durch diese Transformation erhält man mit abnehmendem Durchmesser einen höheren Zerkleinerungsgrad. Da die Beziehung zwischen dem GMD und dem Zerkleinerungsgrad in dem GMD-Bereich von 9 - 26 mm, in dem 99 % aller Werte liegen, nahezu linear verläuft ($r = 0{,}93$; $n = 246$), brachte die varianzanalytische Verrechnung des Zerkleinerungsgrades keine Abweichung von den Ergebnissen der ursprünglichen GMD-Werte.

4.3.1 Oberflächenbearbeitung auf gepflügter Ackerkrume

Zur Beurteilung der Geräte stehen Absiebergebnisse von zwei Herbstbestellungen in Dürnast und Roggenstein und einer Frühjahrsbestellung in Frankendorf zur Verfügung. Wie bereits Tab. 5 (S. 34) zeigte, war der Einfluß der Oberflächenbearbeitung neben dem des Bearbeitungszeitpunktes relativ hoch, während der Einfluß der Grundbodenbearbeitung nur in den Wechselwirkungen mit den Standorten zum Tragen kam. Im folgendem wird zunächst auf den Einfluß der Pflugarbeit näher eingegangen.

1. Einfluß von Schar-Kreiselpflug auf die Zerkleinerung durch die Minimalbestellgeräte

   Zum Einsatz kamen der Scharpflug mit einem Universalstreichblech und ein Kreiselpflug mit drei Kreiseln (Drehzahl: 260 Upm)

Die Fahrgeschwindigkeit beim Pflügen lag zwischen 5 und 7 km/h. Nach dem Pflügen war ein deutlicher Unterschied zwischen den Auswirkungen der beiden Pflugarten zu erkennen (Abb. 9).

Abb. 9: Krumenoberfläche nach dem Pflügen mit dem Scharpflug (links) und dem Kreiselpflug (rechts).

Der Scharpflug hinterließ eine weitaus rauhere und unebenere Oberfläche als der Kreiselpflug. Dieser Unterschied brachte für den Zerkleinerungseffekt der nachfolgenden Geräte ein überraschendes Ergebnis. Erwartet man, daß sich die feinere Krümelung durch den Kreiselpflug nach der Oberflächenbearbeitung auch in einem feineren Saatbett äußert, so war dies nur in Dürnast 1972 der Fall (Tab.8). Nach dem Kreiselpflug lag der Zerkleinerungsgrad aller Bestellgeräte bei 5,90, nach dem Scharpflug bei 5,45.
Zu den anderen Bearbeitungsterminen hatte die unterschiedliche Pflugarbeit entweder keinen Einfluß auf die nachfolgende Zerkleinerung der einzelnen Bestellgeräte (Dürnast/1973; Roggenstein/ 1973) oder die rauhere Krume nach dem Scharpflug wurde

feiner zerteilt als die des Kreiselpfluges (Roggenstein/1972, Tab. 8).

Tabelle 8:

Einfluß der Pflugarbeit auf den Zerkleinerungsgrad (ZG) der Bestellgeräte

	Roggenstein		Dürnast	
	Okt. 1972	Okt. 1973	Okt. 1972	Nov. 1973
WG (Gew.%)	18,7	17,3	19,6	22,1
Scharpflug	7,22 a	6,72 a	5,45 a	4,15 a
Kreiselpflug	5,78 b	6,24 a	5,90 b	4,15 a
	$GD_{5\%}$ = 0,80		$GD_{5\%}$ = 0,45	

Zusammenfassend ergibt sich kein einheitliches Bild über den Einfluß von Schar- und Kreiselpflug auf den Zerkleinerungsgrad der Bestellgeräte. Die erhoffte höhere Zerkleinerung der Bestellgeräte auf den Kreiselpflugflächen traf nicht ein.

2. Zerkleinerungseffekt der Minimalbestellgeräte

Ziel der Saatbettbereitung war es, mit den Minimalbestellgeräten in einem Arbeitsgang die gleiche Zerkleinerung zu erzielen wie mit der konventionellen Gerätekombination in zwei Arbeitsgängen. Hierzu wurde mit den zapfwellengetriebenen Geräten bei schlechter Bearbeitbarkeit langsamer gefahren, da bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit der Fräsmesser oder Zinken der Kreiselegge die Zerkleinerungsintensität bei abnehmender Vorfahrt ansteigt. Bei feuchtem Bodenzustand im November 1973 in Dürnast war die Vorfahrt im Durchschnitt um 0.12 m/s langsamer als im Oktober 1972 (Tab. 9).

Die Vorfahrt war auf Schar- und Kreiselpflugparzellen gleich und über die gesamte Parzellenlänge konstant.

Tabelle 9:

Fahrgeschwindigkeit der Minimalbestellgeräte in m/s zur Bearbeitung des gepflügten Ackers.

	Frankendorf März 73	Roggenstein Okt. 72	Roggenstein Okt. 73	Dürnast Okt. 72	Dürnast Nov. 73
WG (Gew.%)	18,5	18,7	17,3	19,6	22,1
konv. Komb.	2,20	2,22	2,20	1,60	1,50
Rüttelegge	1,45	1,39	1,45	1,19	0,94
Kreiselegge	1,44	1,39	1,46	1,15	1,46
Feingrubber	2,20	2,22	2,22	1,60	1,54
Fräse	1,65	1,39	1,61	1,50	1,02
$\bar{x}$	1,79	1,72	1,79	1,41	1,29

Wenn man die Vorarbeit der Pflüge außer acht läßt und den Zerkleinerungsgrad der Bestellgeräte nur nach dem Scharpflug betrachtet(Tab. 10), dann ergab sich für alle Standorte und Bearbeitungstermine folgende Reihung in der Zerkleinerung:

Rüttelegge > konv.Kombination = Kreiselegge > Fräse = Feingrubber.

Nach dieser Rangfolge werden die Geräte in Tabelle 10 aufgeführt, da sich diese Rangfolge zu jedem Bearbeitungstermin nur mit geringen Veränderungen wiederholte. Mit der Rüttelegge und der Kreiselegge gelang es am besten, den Zerkleinerungsgrad wie mit der konventionellen Kombination zu erzielen. Die Rüttelegge tendierte im Durchschnitt zu einem höheren Zerkleinerungsgrad (8.48, Tab. 10), die Kreiselegge zu einem geringeren (ZG = 6.78). Die Fräse und der Feingrubber hatten einen geringeren Zerklei-

nerungsgrad (ZG: 6.13; 5.47). Dabei erzeugte die Fräse zu manchen Zeitpunkten ein feineres Saatbett als der Feingrubber. Daß die Fräse bei den Standardversuchen keine höhere Zerkleinerung erzielte, lag an der Tatsache, daß eine zu feine Zerkleinerung, die in früheren Versuchen eine schädliche Verschlämmung hervorrief, durch eine größere Bissenlänge verhindert werden sollte.

Tabelle 10:

Einfluß der Bestellgeräte auf den Zerkleinerungsgrad (ZG) an verschiedenen Bearbeitungsterminen

Vorarbeit: Scharpflug
$GD_{5\%} = 0,44$

	Frankendorf 1973	Roggenstein 1972	Roggenstein 1973	Dürnast 1972	Dürnast 1973	$\bar{x}$	VK
WG (Gew.%)	18,5	18,7	17,3	19,6	22,1		
Rüttelegge	11,03 a	9.93 a	7,50 a	7,06 a	6,87 a	8,48 a	23,2
konv.Komb.	10.74 a	8,20 b	7,89 a	6,41ab	4,15bc	7,42 b	32,4
Kreiselegge	11,73 a	5,52 c	6,10 b	6,18 b	4,37 b	6,78 b	41,7
Fräse (H)	9,06 b	5,55 c	7,20 b	4,92 c	4,13 c	6,13 c	33,0
Feingrubber	8,01 c	5,22 c	5,70 c	4,27 d	3,94bc	5,47 c	28,6
	10,11 a	6,88 b	6,82 b	5,77 c	4,69 d		

Sucht man ein Maß für die Homogenität der Arbeit, dann bietet sich der Variationskoeffizient (VK, Tab. 10) an. Er war bei der Rüttelegge am geringsten, bei der Kreiselegge am höchsten, die anderen Geräte lagen zwischen beiden, d.h. die Rüttelegge zerkleinerte den Boden ziemlich unabhängig von Bodenart und Bodenzustand, während die Zerkleinerungswirkung der Kreiselegge bei höherem Bodenwassergehalt oder anderem Boden stärker eingeschränkt wurde als bei den übrigen Geräten.

In Frankendorf lag der Zerkleinerungsgrad um mehr als 4 Einheiten über dem der anderen Orte. Frankendorf kann aber nicht direkt mit den beiden anderen Orten verglichen werden, da hier die Bestellung im Frühjahr durchgeführt wurde. Die Frostgare und die geringere Aggregatstabilität zu Beginn einer Vegetationsperiode steigern den Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte. Diese Steigerung war besonders bei der Kreiselegge zu beobachten, die bei dem gegebenen Bodenzustand sogar den gleichen Zerkleinerungsgrad erreicht hatte wie die Rüttelegge. Läßt man Frankendorf außer acht, dann war der Zerkleinerungsgrad in Roggenstein jeweils größer als in Dürnast. Hier bestätigt sich die in der Praxis gemachte Erfahrung, daß der sandhaltige Aueboden in Roggenstein leichter zu bearbeiten ist als der tonige Lehm der Ackerbraunerde in Dürnast.

3. Einfluß der Bodenfeuchte auf die Zerkleinerung durch die Minimalbestellgeräte

Die Konsistenz des Bodens beeinflußt den Zerteilungseffekt der Geräte. Unter dem Begriff Konsistenz versteht man den Widerstand des Bodens gegen Kompression, seine Plastizität und seine Klebrigkeit. Die Konsistenz wird durch die gegenläufige Verschiebung der Kohäsions- und Adhäsionskräfte bei Änderung des Wassergehaltes bestimmt. Neben Bodeneigenschaften, wie Ton-, Sand- und Humusgehalt (PUCHNER, 1913(89); BAVER, 1930(11)), ist der Wassergehalt des Bodens eine der Hauptursachen für den differenzierten Zerkleinerungseffekt zu den verschiedenen Bearbeitungsterminen. Trägt man den Zerkleinerungsgrad der Geräte in Abhängigkeit des Bodenwassergehaltes auf (Abb. 10), dann zeigt sich meist mit zunehmendem Wassergehalt eine Abnahme des Zerkleinerungsgrades. Eine Ausnahme stellte die Rüttelegge dar, die in Roggenstein bei höherem Wassergehalt einen höheren Zerkleinerungsgrad besaß. Der Rückgang des

Zerkleinerungseffektes beruht auf einer Zunahme des Haftvermögens (=Adhäsion), das mit dem Wassergehalt wächst.

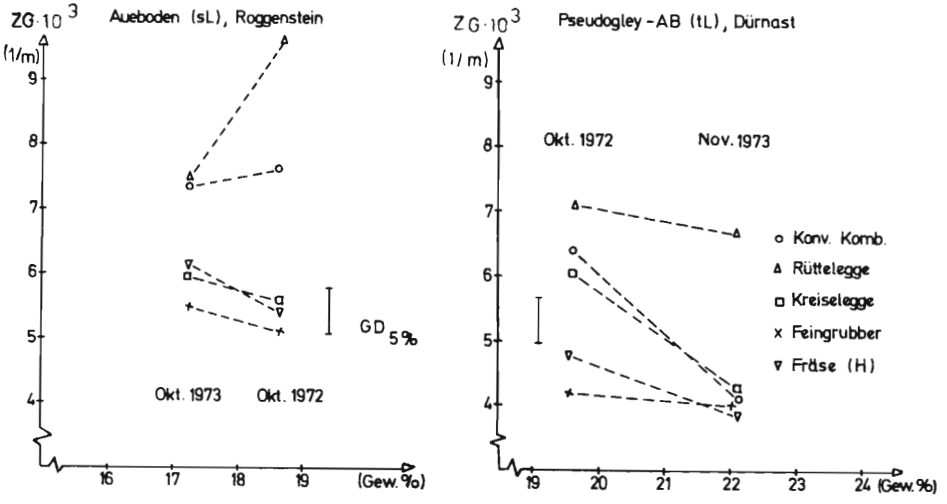

Abb. 10: Einfluß des Wassergehaltes auf den Zerkleinerungsgrad der Bestellgeräte auf gepflügtem Boden.

Der Einfluß der Bodenfeuchte kam nicht deutlicher zum Ausdruck, da bei höherer Bodenfeuchte die Zerkleinerungsintensität der Geräte gesteigert worden war. Daß dennoch der Zerkleinerungseffekt bei höherer Feuchte (Pseudogley-AB, Dürnast, Abb. 10) geringer war als bei trockenerem Bodenzustand, weist auf den starken Einfluß des Bodenwassergehaltes hin. Die Verbindungslinien zwischen den Meßpunkten stellen keine lineare Beziehung dar, sondern dienen nur zur leichteren Interpretation der Werte.

4.3.2 Oberflächenbearbeitung ohne Pflugfurche

Während bisher der Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte nach vorausgegangener Grundbodenbearbeitung dargestellt wurde, soll nun der Zerkleinerungseffekt von Bestellgeräten ohne Grundbodenbearbeitung besprochen werden. Als einziges Bestellgerät, das ohne Pfluglockerung ein günstiges Saatbett herrichten kann, hat die Fräse eine größere Verbreitung gefunden.

1. Zerkleinerungseffekt zweier Fräsen

Es wurden auf der ungepflügten Versuchsfläche zwei Fräsen eingesetzt, die sich im wesentlichen durch die Messerform und durch die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors unterschieden. Dennoch waren die Zerkleinerungsgrade der beiden Fräsen nahezu gleich (Tab. 11). Mit einer Ausnahme in Dürnast Oktober 1972, wo die Fräse (R) den Boden etwas feiner zerteilt hatte, lagen die Unterschiede der Zerkleinerungsgrade im Bereich der Grenzdifferenz.

Tabelle 11:

Zerkleinerungsgrad zweier Fräsen

($GD_{5\%}$ = 0.55)

	Roggenstein		Dürnast	
	Okt. 1972	Okt. 1973	Okt. 1972	Nov. 1973
Wassergehalt	18,7	17,3	19,6	22,1
Fräse (H)	3,74 a	4,62 a	3,69 a	3,71 a
Fräse (R)	3,82 a	4,27 a	4,36 b	3,23 a

Nach der Zerkleinerungswirkung der unterschiedlichen Fabrikate dürfte die Frage, wie fein die Fräse ohne Pfluglockerung den Boden zerkleinert, größeres Interesse finden.

2. Einfluß des Pflügens auf den Zerkleinerungseffekt der Fräse

Im Kapitel 4.3.1 wurde der Einfluß von Schar- und Kreiselpflug auf den Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte untersucht. Den Lockerungsanteil des Pfluges gegenüber dem der Bestellgeräte konnte man bei der vorhandenen Untersuchungsmethode nicht abgrenzen. Bei der Fräse (H), die sowohl auf gepflügtem als auch ungepflügtem Boden eingesetzt wurde, läßt sich der Effekt des Pfluges gegen den der Fräse genau bestimmen. Die Differenz im Zerkleinerungsgrad zwischen Fräse nach Scharpflug und Fräse ohne Pflugvorarbeit beruht auf dem Lockerungseffekt des Pfluges, da bei gleicher Bissenlänge und gleicher Arbeitstiefe die Zerkleinerungsintensität gleich groß ist. Der höhere Zerkleinerungsgrad auf den gepflügten Flächen ist auf die vorausgegangene Lockerung durch den Pflug zurückzuführen (Tab. 12). Das Pflügen erhöhte den Zerkleinerungseffekt der Fräse in Roggenstein um 1.8 und 3.5 Einheiten, in Dürnast nur einmal 1.2 Einheiten.

Tabelle 12 :

Zerkleinerungsgrad der Fräse (H) nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung.
Arbeitstiefe: 6 cm; WG: Wassergehalt; l_B: Bissenlänge

	Roggenstein		Dürnast	
	Okt. 1972	Okt. 1973	Okt. 1972	Nov. 1973
WG (Gew.%)	18,7	17,3	19,6	22,1
l_B (cm)	22,4	26,1	20.0	17,3
Scharpflug	5,55 a	7,20 a	4,92 a	3,94 a
Kreiselpflug	-	-	5,04 a	3,54 a
ohne Pflug	3,74 b	3,69 b	3,69 b	3,72 a
	$GD_{5\%}$ = 1.34		$GD_{5\%}$ = 0,81	

Die unterschiedliche Oberflächenrauheit zwischen Schar- und Kreiselpflug hatte für die Zerkleinerung der Fräse keine Bedeutung. 1972 und 1973 lag der Unterschied im Zerkleinerungsgrad innerhalb der Grenzdifferenzen.

Der Wassergehalt zum Bearbeitungszeitpunkt hatte auch beim Fräsen einen differenzierten Einfluß. In Roggenstein lag der Zerkleinerungsgrad nach dem Pflügen und Fräsen bei höherem Wassergehalt im Oktober 1972 um 1.7 Einheiten niedriger als im Oktober 1973. Auch in Dürnast war die Zerkleinerung bei höherem Wassergehalt im November 1973 eingeschränkt. Die Bearbeitbarkeit im November 1973 war so schlecht, daß selbst der Lockerungseffekt des Pflügens überdeckt wurde. Der Zerkleinerungsgrad nach Scharpflug lag bei 3.94 und nach dem Fräsen ohne Pflug bei 3.72. Die Werte zu den einzelnen Bearbeitungsterminen dürfen wegen der unterschiedlichen Bissenlänge nicht verglichen werden, da mit abnehmender Bissenlänge die Zerkleinerungsintensität ansteigt. Es zeigt sich aber, daß bei höherer Bodenfeuchte trotz geringerer Bissenlänge der Zerkleinerungsgrad geringer ist. Man kann daraus schließen, daß der höhere Wassergehalt des Bodens die Zerkleinerung vermindert.

Der Zerkleinerungsgrad der Fräse ohne Pflugvorarbeit hatte zu jedem Bearbeitungstermin einen Wert von 3.70. Dies erweckt den Anschein, als ob der Bodenzustand und die Bodenarten keinen Einfluß ausübten. Die Werte der einzelnen Jahre dürfen aber nicht miteinander verglichen werden, da die Bissenlänge der Fräse in den einzelnen Jahren verschieden war. Um den Einfluß der Bissenlänge und des Wassergehaltes näher zu untersuchen, wurde ein gesonderter Fräsversuch angelegt.

3. Einfluß der Bissenlänge und des Wassergehaltes auf den Zerkleinerungseffekt der Fräse

In der Nähe von Freising (Ast) wurde der Versuch auf einem sandigen Lehmboden durchgeführt. Innerhalb von zwei Wochen trocknete der Boden bedingt durch die Witterung kontinuierlich ab, sodaß bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt gefräst werden konnte. Bei vier verschiedenen Wassergehalten wurde der Boden mit unterschiedlicher Vorfahrt und konstanter Drehzahl des Fräsenrotors zerkleinert. Mit zunehmender Vorfahrt wird die Bissenlänge der Fräsmesser größer und somit die Zerkleinerungsintensität geringer. Bei einer Bissenlänge von 11.3 cm lag der Zerkleinerungsgrad im Durchschnitt bei 13.0 und ging dann bis auf 6.3 bei einer Bissenlänge von 42.1 cm zurück (Tab. 13). Diese Durchschnittswerte wiederholen sich bei den unterschiedlichen Wassergehalten.

Tabelle 13:

Zerkleinerungsgrad einer Fräse bei steigender Bissenlänge (l_B) und unterschiedlichem Wassergehalt (WG)

WG Gew.%	l_B (cm)					$\bar{x}$
	11,3	17,8	27,5	34,8	42,1	$GD_{1\%}$=1,1
17,6	14,3 a	14,0 a	7,2 b	5,9 bc	6,6 c	9,6 b
15,4	14,4 a	10,1 b	10,5 b	8,0 c	5,6 d	9,7 b
13,8	14,4 b	15,8 a	8,8 c	7,5 d	7,6 d	10,8 a
11,4	9,0 a	6,6 b	5,5 bc	5,8 bc	5,4 c	6,5 c
$GD_{1\%}$=1,2	13,0 a	11,6 b	8,0 c	6,8 d	6,3 d	

Zeichnet man den Zerkleinerungsgrad in Abhängigkeit der Bissenlänge auf, dann tritt die Beziehung deutlicher hervor (Abb. 11). Sie hat den Verlauf einer Hyperbel. Die Zunahme der Bissenlänge bis etwa 30 cm ist mit einem starken Rückgang der Zerkleinerung verbunden. Oberhalb von 30 cm strebt die Zerkleinerung einem konstanten Wert zu.

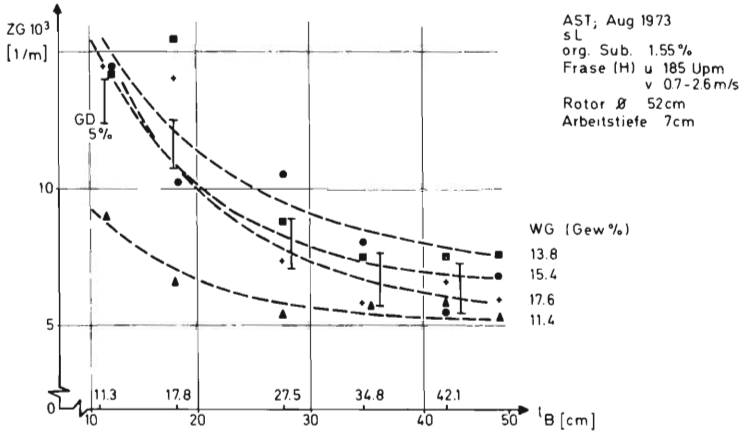

Abb. 11: Einfluß der Bissenlänge (l_B) auf den Zerkleinerungsgrad einer Fräse.

Mit Hilfe der Regressionsanalyse ergab sich eine Beziehung zwischen Zerkleinerungsgrad und Bissenlänge, die als 1/x-Funktion berechnet wurde. Die Parameter der Schätzfunktionen ließen sich statistisch hochsignifikant absichern (Tab. 14).

Tabelle 14:

Schätzfunktionen für die Beziehung zwischen Bissenlänge (l_B) und Zerkleinerungsgrad (ZG) einer Fräse.

WG Gew.%	ZG = a + b/l_B; (n = 40)	r	t_b
17,6 %	ZG = 2,95 + 142,5/l_B	0.80 (xx)	8,27 (xx)
15,4 %	ZG = 4,42 + 113,7/l_B	0,78 (xx)	7,65 (xx)
13,8 %	ZG = 4,96 + 125,6/l_B	0,72 (xx)	6,39 (xx)
11,4 %	ZG = 3,97 + 54,0/l_B	0,67 (xx)	5,61 (xx)

n = Anzahl der Wertepaare

r = Korrelationskoeffizient

t_b= Testwert für Regressionskoeffizient

Der Grund für diese Beziehung ist im Zerkleinerungsvorgang der Fräse zu suchen, der folgenden Ablauf hat:

Die Fräsmesser schneiden einen Bissen aus dem Boden heraus, werfen einen Teil an das Prallblech, den anderen Teil werfen sie um die Drehachse nach vorn auf den unbearbeiteten Boden (Abb. 12). Je kleiner nun die Bissenlänge ist, desto öfter werden die nach vorn geworfenen Bodenaggregate erneut erfaßt und zerkleinert. Die exponentielle Zunahme der Zerkleinerung setzt dann ein, wenn die Bissenlänge kleiner als die Wurfweite nach vorn ist. Die Wurfweite ist bei konstanter Umfangsgeschwindigkeit von der Prallhaube über der Drehachse abhängig. Bei der Fräse (H) überdeckt die Haube die Hälfte der Umlaufbahn. Der Abstand von der Bodenoberfläche ist etwa 20 cm (Abb. 12).

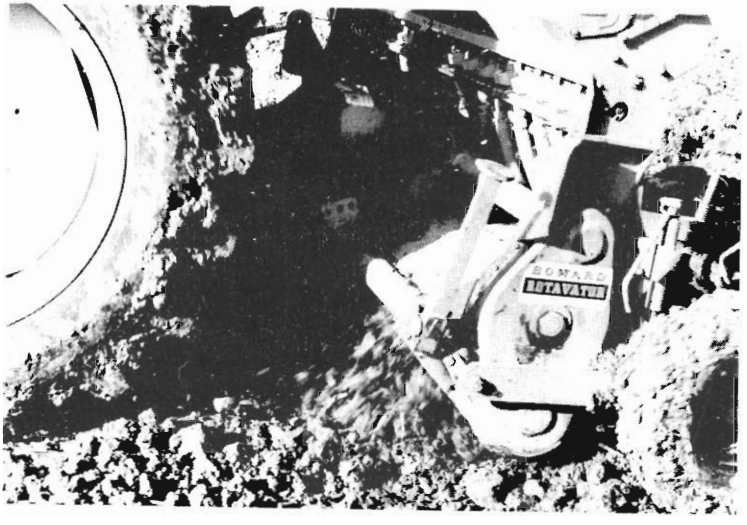

Abb. 12: Ablage der zerkleinerten Bodenaggregate auf den noch ungefrästen Boden.

Der Rückgang der statistischen Testgrößen (r, t_b) in Tabelle 14, der mit sinkendem Wassergehalt auftritt, deutet bereits an, daß mit sinkendem Wassergehalt der Einfluß der Bissenlänge zurückgeht. Zeichnet man den bei gleicher Bissenlänge erzielten Zerkleinerungsgrad in Abhängigkeit vom Wassergehalt auf, ergibt sich eine Parabel, die bei einem Wassergehalt von 15 Gew.% ein Maximum hat (Abb.13).

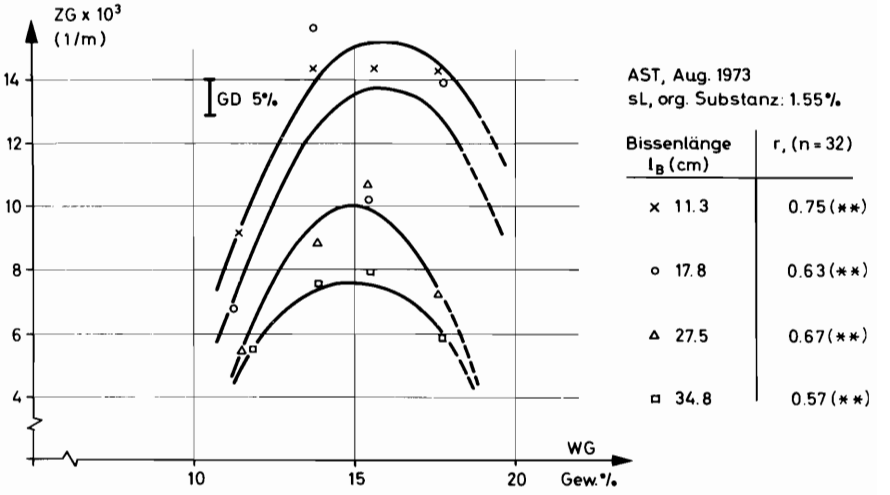

Abb. 13: Einfluß des Wassergehaltes auf den Zerkleinerungseffekt einer Fräse.

Diese Parabeln lassen sich in einer Regressionsanalyse durch eine polynome Gleichung beschreiben. In Tabelle 15 sind diese Schätzfunktionen für die Beziehung zwischen Zerkleinerungsgrad und Wassergehalt angegeben. Mit einer Ausnahme (l_B= 42,1 cm) lassen sich die Korrelationskoeffizienten und F-Werte statistisch signifikant absichern.

Errechnet man das Maximum jeder Kurve, dann erhält man den Wassergehalt bei dem eine maximale Zerkleinerung erzielt wird (WG bei ZG_{max}, Tab. 15). Danach liegt das Maximum zwischen 14,7

und 16 Gew.%. Bildet man den Mittelwert unter Ausschluß der nicht signifikanten Funktion von l_B = 42,1 cm, dann erhält man einen Wert von 15.4 Gew.%.

Tabelle 15:

Schätzfunktionen für die Beziehung zwischen Zerkleinerung (ZG) und dem Bodenwassergehalt (WG) bei unterschiedlicher Bissenlänge (l_B) einer Fräse.

l_B(cm)	ZG = a+b·(WG) + c·(WG)^2; (n = 32)	r	F(2,29)	WG bei ZG max
11,3	ZG = -60,9+ 9,6(WG) - 0,30 (WG)^2	0,75(xx)	17,6(xx)	16,0
17,8	ZG = -72,6+10,8(WG) - 0,34 (WG)^2	0,63(xx)	9,3(xx)	15,9
27,5	ZG = -70,9+10,8(WG) - 0,36 (WG)^2	0,67(xx)	11,8(xx)	15,0
34,8	ZG = -35,0+ 5,9(WG) - 0,20 (WG)^2	0,57(xx)	6,7(xx)	14,7
42,1	ZG = 9,8+ 2,6(WG) - 0,07 (WG)^2	0,25(ns)	1,0(ns)	18,7

Die Parabel beschreibt die Beziehung zwischen Zerkleinerungsgrad und Wassergehalt relativ gut. Sie gilt aber nur für den vorliegenden Boden (sL) und den Wassergehaltsbereich von 11 bis 18 Gew.%. Unterhalb und oberhalb dieser Grenzen strebt der Zerkleinerungsgrad dem Wert Null zu, sodaß die Parabel den natürlichen Verlauf nicht vollkommen erfaßt. Eine umfassende Funktion würde wahrscheinlich einen glockenförmigen Kurvenverlauf haben .

Folgende Schlußfolgerungen lassen sich aus den Ergebnissen in diesem Fräsversuch ableiten:

1. Über die Bissenlänge der Fräsmesser läßt sich der Zerkleinerungseffekt steuern. Eine Variation der Zerkleinerung ist jedoch nur bei einer Bissenlänge kleiner als 30 cm möglich, oberhalb von 30 cm ist die Zerkleinerung konstant.

2. Die Zerkleinerung bei einer bestimmten Bissenlänge ist von der Bearbeitbarkeit abhängig, die bei dem Fräsversuch im unterschiedlichen Wassergehalt zum Ausdruck kam. Der gesamte Bereich der Bearbeitbarkeit erstreckte sich auf dem vorliegenden sandigen Lehm von 10 bis 20 Gew.%. Bei einem Wassergehalt zwischen 14 und 16 % läßt sich der Boden am feinsten zerkleinern.

3. Bei gegebenem Wassergehalt und gewünschtem Zerkleinerungseffekt muß sich die entsprechende Bissenlänge einstellen lassen. Angenommen, der Wassergehalt liegt bei 15 %, das zu erzeugende Aggregatgemisch soll einen mittleren Durchmesser von 12 mm haben ($\triangleq$ ZG = 8), dann muß eine Bissenlänge zwischen 34,8 und 27,5 cm eingestellt werden (Abb.13).

Unter den klimatischen Bedingungen Mitteleuropas kann aber der günstige Wassergehalt zur Bearbeitung meist nicht abgewartet werden. Je nach Bodenzustand muß dann die Intensität der Bearbeitung dem augenblicklichen Zustand angepaßt werden. Besonders geeignet sind dazu die zapfwellengetriebenen Bestellgeräte, deren Zerkleinerungsintensität leicht variiert werden kann. Mit der Intensität der Bearbeitung ändert sich aber der erforderliche Leistungsaufwand, der im ausgewogenen Verhältnis zum Zerkleinerungseffekt stehen sollte. Welche Beziehungen zwischen dem Zerkleinerungseffekt und dem Leistungsaufwand zur Erzielung dieses Effektes bestehen, wird im nächsten Kapitel dargestellt.

4.3.3 Leistungsaufwand und Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte

Die Vorzüglichkeit eines Bodenbearbeitungsgerätes ist hauptsächlich vom Zerkleinerungseffekt und vom Leistungsaufwand abhängig, der zur Erzeugung dieses Zerkleinerungseffektes notwendig ist. Erst eine Maßzahl, in der beide Faktoren - Aufwand und Arbeitsqualität - erfaßt sind, erlaubt die Beurteilung der Bestellgeräte.

Der Leistungsbedarf eines Gerätes ist umso größer, je größer das bearbeitete Bodenvolumen je Zeiteinheit ist. Aus dem Verhältnis von Leistung und bearbeiteten Bodenvolumen je Zeiteinheit errechnet sich ein Arbeitswert, der im folgenden als spezifische Arbeit (A_{spez}) bezeichnet wird (ZELTNER, 1975 (120)). Das bearbeitete Bodenvolumen je Zeiteinheit ($\frac{V}{t}$) ist das Produkt aus Arbeitstiefe (a), Arbeitsbreite (b) und Fahrgeschwindigkeit ($\frac{s}{t}$). Die Leistung (P) ist der Quotient von Arbeit (A) und Zeit (t).

$$\frac{V}{t} = a \cdot b \cdot \frac{s}{t} \quad (m^3/s)$$

$$P = \frac{A}{t} \quad (kJ/s)$$

$$A_{spez} = \frac{A}{V} \quad \left(\frac{kJ}{m^3}\right)$$

Die Maßzahl A_{spez} als einziges Vergleichskriterium der Bestellgeräte hat nur Gültigkeit bei konstanter Zerkleinerung. Bei unterschiedlicher Zerkleinerung ist es daher notwendig, den Zerkleinerungsgrad des Aggregatgemisches zu berücksichtigen.

Unter der Voraussetzung, daß sich der Zerkleinerungsgrad (Dimension: ZG $\cdot$ 10^{-3} 1/m) proportional zur spezifischen Arbeit verändert, läßt sich aus dem Verhältnis der beiden Größen der spe-

zifische Zerkleinerungsaufwand (Z_{spez}) berechnen:

$$Z_{spez} = \frac{A_{spez}}{ZG} \cdot 10^3 \left(\frac{kJ}{m^3} \cdot m\right)$$

Der spezifische Zerkleinerungsaufwand zeigt an, wieviel Arbeit/Bodenvolumen von einem Bodenbearbeitungsgerät aufgewendet wird, um eine Zerkleinerungseinheit zu erzeugen. Je geringer der spezifische Zerkleinerungsaufwand ist, desto weniger Leistung wird für eine Zerkleinerungseinheit verbraucht.

Zur Bestimmung des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes wurden zur Bestellung von ZELTNER, 1975 (120) die Leistungsmessungen durchgeführt; der Zerkleinerungsgrad wurde im Rahmen dieser Arbeit ermittelt. Die gemessene Leistung setzt sich zusammen aus der Zugleistung, die an den Unterlenkern des Schleppers zur Wirkung kam, und der Zapfwellenleistung, die zur Bewegung der Zerkleinerungswerkzeuge notwendig war.

1. Spezifischer Zerkleinerungsaufwand der Fräse

Ehe auf die Gegenüberstellung der einzelnen Bestellgeräte eingegangen wird, soll an Hand des gesonderten Fräsversuches, der bei unterschiedlichem Bodenwassergehalt mit unterschiedlicher Zerkleinerungsintensität der Fräse (H) durchgeführt wurde, die Beziehung zwischen spezifischer Arbeit und Zerkleinerungsgrad dargestellt werden (Abb. 14). Mit steigender spezifischer Arbeit erhöhte sich proportional der Zerkleinerungsgrad der Fräse. Die Beziehung verläuft linear. Sie wurde aus logischen Gründen durch den Nullpunkt gelegt, da bei nichtverrichteter Arbeit ($A_{spez} = 0$) auch keine Zerkleinerung erzielt wird ($ZG = 0$). Die statistischen Testgrößen lassen sich hochsignifikant absichern ($r = 0{,}89$, $t_b = 25{,}7$ bei $n = 20$).

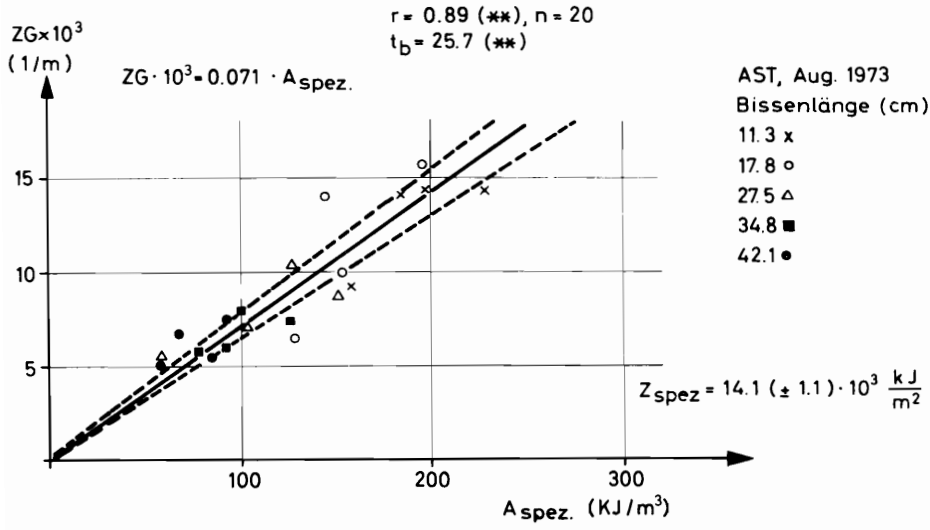

Abb. 14: Beziehung zwischen der spezifischen Arbeit und dem Zerkleinerungsgrad einer Fräse

Aus dieser Beziehung folgt, daß der spezifische Zerkleinerungsaufwand dem reziproken Wert der Geradensteigung entspricht. Der spezifische Zerkleinerungsaufwand der Fräse (H) hatte auf dem leichten Boden (sL) von Ast bei Freising folgenden Wert:

$$ZG \cdot 10^3 = 0{,}071 \cdot A_{spez}$$

$$Z_{spez} = \frac{A_{spez}}{ZG} = \frac{1}{0{,}071} \cdot 10^3$$

$$Z_{spez} = 14{,}1 \cdot 10^3 \quad (kJ/m^2)$$

Da der Vertrauensbereich (95 %) der Steigung bekannt ist ($0{,}066 \leq b \leq 0{,}077$), ergibt sich für die untere Grenze $13{,}0 \cdot 10^3$ kJ/m², für die obere Grenze $15{,}2 \cdot 10^3$ (kJ/m²). Aus dieser Beziehung folgt,

daß beim Fräsen des sandigen Lehms die spezifische Arbeit zur Erzeugung einer Zerkleinerungseinheit konstant ist. Mit steigender Zerkleinerungsintensität der Fräse durch Verkürzung der Bissenlänge steigt die spezifische Arbeit zur Erzeugung eines feineren Aggregatgemisches linear. Diese Beziehung gilt nur für den Bereich des Zerkleinerungsgrades von 5 bis 15 $\cdot$ 10^{-3} (1/m). Bei einem Zerkleinerungsgrad oberhalb von 15, das entspricht einem Gewogenen Mittleren Durchmesser von kleiner als 7 mm, wird die Gerade wahrscheinlich zur Abzisse hin abflachen, da sich der Boden mit der Fräse nicht unbegrenzt fein zerkleinern läßt.

2. Spezifischer Zerkleinerungsaufwand der Bestellgeräte

Bei einer Beurteilung der Bestellgeräte mit Hilfe des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes muß man Einschränkungen machen; denn im Gegensatz zum gesonderten Fräsversuch, bei dem 20 Wertepaare in die Berechnung eingingen, kann man in den Standardversuchen nur auf ein gemessenes Wertepaar zurückgreifen. Die ermittelten Ergebnisse haben daher nur unter den gegebenen Versuchsbedingungen Gültigkeit. Bei einer allgemeingültigen Aussage muß man vorerst sehr vorsichtig sein.

Einen ersten Überblick über die Rangfolge der Bestellgeräte mag Tabelle 16 geben. Der Vergleich zeigt an, daß der Arbeitsaufwand zur Erzeugung einer Zerkleinerungseinheit für die Kreiselegge zu jedem Bearbeitungstermin am größten war. Die weitere Reihenfolge der Bestellgeräte war:

Kreiselegge $\geq$ Fräse (H) $>$ Rüttelegge $\geq$ Feingrubber

Tabelle 16 : Spezifischer Zerkleinerungsaufwand (Z_{spez}) der Bestellgeräte zu verschiedenen Bearbeitungsterminen
Grundbodenbearbeitung : Scharpflug

Bearbeitungstermin	Gerät	$Z_{spez} \cdot 10^{-3}$ (kJ/m²)	Spannbreite $Z_{spez} \cdot 10^{-3}$
Dürnast Okt. 1972	Feingrubber	12,0	10,9 - 13,5 a
	Rüttelegge	15,8	14,7 - 16,7 b
	Fräse (H)	21,1	19,3 - 23,2 c
	Kreiselegge	22,6	21,1 - 24,4 c
Dürnast Nov. 1973	Feingrubber	13,3	12,0 - 14,9 a
	Rüttelegge	15,6	14,7 - 16,7 a
	Fräse (H)	38,4	34,4 - 43,3 b
	Kreiselegge	52,7	47,8 - 58,8 c
Roggenstein Okt. 1973	Feingrubber	9,6	8,9 - 10,5 a
	Rüttelegge	11,3	10,7 - 12,1 b
	Fräse (H)	15,1	14,2 - 16,1 c
	Kreiselegge	25,0	23,3 - 27,0 d

Spannbreite von $Z_{spez} = \frac{A_{spez}}{ZG \pm GD_{5\%}}$

$GD_{5\%}$ = Grenzdifferenz (α = 5%) zum Vergleich der Zerkleinerungsgrade

Am effektivsten bearbeiteten der Feingrubber und die Rüttelegge den Boden. Zu jedem Bearbeitungstermin benötigten diese Geräte die geringste Arbeit, um eine Zerkleinerungseinheit zu erzeugen. Im Durchschnitt lag das Verhältnis des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes des Feingrubbers und der Rüttelegge zu dem der Fräse bei etwa 1 : 2, zu dem der Kreiselegge lag es sogar bei 1 : 3. Selbst wenn man die Spannbreite des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes berücksichtigt, ändert sich kaum etwas an der Rangfolge der Geräte (die Spannbreite wurde nur durch den Zerkleinerungsgrad variiert, da die Leistungsmessungen keine Streuung hatten).

Wenn derart gravierende Unterschiede zwischen den Geräten auftreten, stellt sich die Frage nach den Ursachen. Drei variable Größen gingen in die Berechnung des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes ein: der Leistungsaufwand (P) des Gerätes, der Zerkleinerungsgrad (ZG) und die Fahrgeschwindigkeit (v). Diese Ausgangsdaten zur Bestimmung von Z_{spez} sind im Anhang Tabelle 5 aufgeführt. Mit Hilfe der Definition des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes läßt sich der Einfluß eines Faktors diskutieren, während die restlichen konstant bleiben. Zur Variation wurde die Definition von Z_{spez} in umgewandelter Form verwandt:

$$Z_{spez} = \frac{P}{(a\ b)\cdot v\cdot ZG} \cdot 10^3 \quad (\frac{kJ}{m^2})$$

Die Arbeitstiefe war 6 cm; als Arbeitsbreite (b) wurde 2,5 m angenommen, da die Minimalbestellgeräte mit Ausnahme der Kreiselegge 2,5 m breit waren. Für den Bereich der gemessenen Werte wird zunächst Fahrgeschwindigkeit und anschließend der Zerkleinerungsgrad variiert. Der Einfluß des Leistungsbedarfes muß nicht in einer speziellen Abbildung dargestellt werden, da aus der Definition von Z_{spez} die lineare Abhängigkeit zu ersehen ist. Er wird jedoch bei der Variation von Geschwindigkeit und Zerkleinerung berücksichtigt.

Der Versuchsbereich der Fahrgeschwindigkeit erstreckte sich von etwa 0,9 bis 2,3 m/s (Abb. 15). In diesem Bereich ändert sich der spezifische Zerkleinerungsaufwand bei einem geringen Leistungsbedarf von 10 kW relativ wenig. Je höher der Leistungsbedarf eines Gerätes ist, desto stärker läßt sich der spezifische Zerkleinerungsaufwand mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit vermindern. Geschwindigkeiten über 3,0 m/s bringen kaum noch eine Abnahme des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes. Bei Geschwindigkeiten unter 1,0 m/s steigt der spezifische Zerkleinerungsaufwand sehr stark an. Ferner

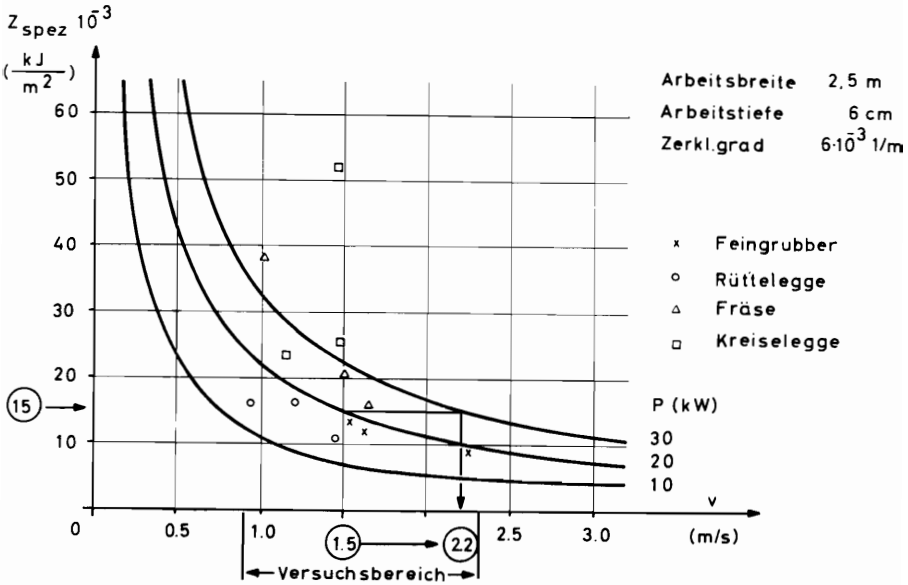

Abb. 15: Einfluß der Fahrgeschwindigkeit (v) auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand (Z_{spez}).

zeigen diese Kurven, daß man z.B. ein Gerät mit einem Leistungsbedarf von 30 kW bedeutend schneller fahren muß als ein Gerät mit 20 kW oder gar 10 kW, wenn man den gleichen spezifischen Zerkleinerungsaufwand erzielen will. Im Versuch zeigte es sich jedoch, daß besonders Geräte mit geringem Leistungsbedarf, wie z.B. der Feingrubber, etwas schneller gefahren werden konnten als Geräte mit höherem Leistungsbedarf. So lag bei der Versuchsdurchführung die Geschwindigkeit der zapfwellengetriebenen Geräte im Bereich zwischen 0,9 und 1,6 m/s, während der Feingrubber mit Geschwindigkeiten zwischen 1,6 und 2,2 m/s gefahren wurde. Diese Geschwindigkeitsbereiche konnten bei der gegebenen Leistungsstärke des Schleppers nicht überschritten werden.

Mit der Fahrgeschwindigkeit steigt der Leistungsbedarf eines Gerätes (ZELTNER, 1976 (120)). Die höhere Geschwindigkeit bringt daher nur dann einen Vorteil, wenn die Zunahme des Leistungsbedarfes den Effekt der höheren Geschwindigkeit nicht aufhebt. Der Grenzwert für die Geschwindigkeitssteigerung errechnet sich aus dem Verhältnis der beiden Geschwindigkeiten und dem Verhältnis der beiden Leistungsbedarfe:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{P_1}{P_2}$$

Angenommen, ein Gerät hat den spezifischen Zerkleinerungsaufwand von 15 (kJ/m^2) bei einem Leistungsbedarf von 20 kW (P_1) und einer Geschwindigkeit von 1,5 m/s (v_1). Eine Steigerung der Vorfahrt bis auf 2,2 m/s bringt nur dann einen Vorteil, wenn der Leistungsbedarf des Gerätes bei 2,2 m/s (v_2) kleiner als 29 kW (P_2) ist.

Diese Überlegungen wurden unter der Voraussetzung gemacht, daß der Zerkleinerungsgrad konstant bleibt. Der Zerkleinerungseffekt eines Gerätes ändert sich aber mit der Fahrgeschwindigkeit. Bei der Fräse wird die Bissenlänge größer, bei den zapfwellengetriebenen Eggen wird die Zinkenbahn im Boden gestreckt. Daraus folgt, daß weniger Boden/Fläche bearbeitet wird und somit der Zerkleinerungsgrad zurückgeht. Will man durch die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit den spezifischen Zerkleinerungsgrad vermindern, ohne auf eine bestimmte Zerkleinerung zu verzichten, muß die Geschwindigkeit der Zerkleinerungswerkzeuge zapfwellengetriebener Geräte ebenfalls erhöht werden.

Die Erhöhung der Zerkleinerung durch ein Gerät hat keinen Einfluß auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand, da mit zunehmendem Zerkleinerungsgrad der Leistungsbedarf bzw. die spezifische Arbeit ansteigt (Abb.14, S.67). Dennoch soll der Einfluß der Zerkleinerung auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand für Geräte mit unterschiedlichem Leistungsbedarf dargestellt werden, da diese Abbildung einen guten Überblick über diese Beziehung gibt (Abb.16).

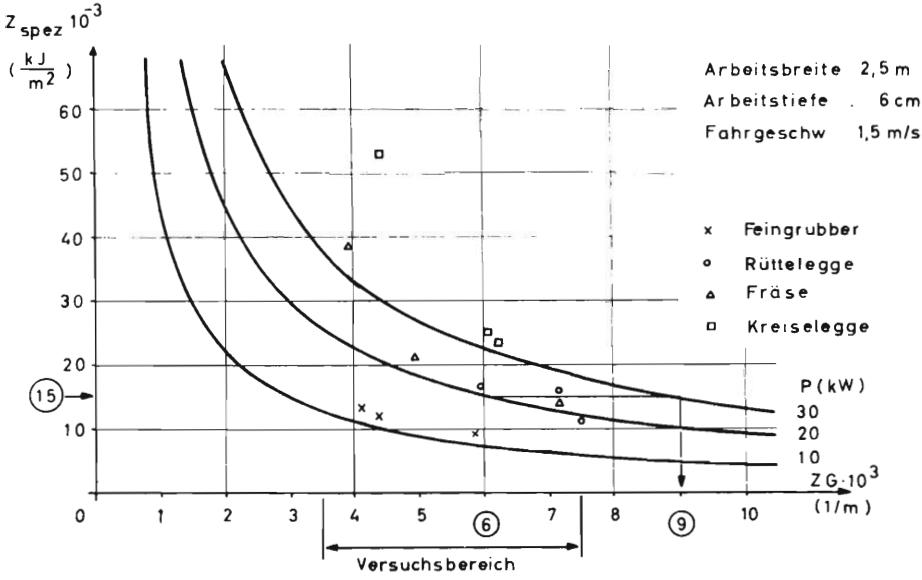

Abb. 16: Einfluß des Zerkleinerungsgrades (ZG) auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand (Z_{spez})

Aus diesen Kurven lassen sich ähnliche Schlüsse ziehen wie zuvor aus der Beziehung zwischen Vorfahrt und spezifischem Zerkleinerungsaufwand. Im Bereich der Versuchswerte - 3,5 bis 7,5 Zerkleinerungseinheiten - muß bei Geräten mit hohem Leistungsbedarf die Zerkleinerung zunehmen, will man einen gleichen spezifischen Zerkleinerungsaufwand erzielen. Erzielt ein Gerät mit einem Leistungsbedarf von 20 kW einen Zerkleinerungsgrad von 6,0 (Abb. 16), dann muß ein Gerät mit 30 kW Leistungsbedarf einen Zerkleinerungsgrad von 9,0 erzeugen.

Betrachtet man nun den spezifischen Zerkleinerungsaufwand der Minimalbestellgeräte, dann zeigt sich, daß für den Feingrubber der geringste Wert errechnet wurde, obwohl der Zerkleinerungsgrad am kleinsten war. Der Zerkleinerungsgrad hat in dem Bereich der Versuchswerte einen sehr geringen Einfluß auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand. Es muß aber in diesem Zusammenhange darauf hingewiesen werden, daß die Bestellgeräte auf gepflügtem Boden eingesetzt wurden, d.h. der Boden hatte bereits eine gewisse Lockerung erfahren. Nachdem sich der Lockerungseffekt des Pfluges mit der hier verwandten Methode nicht erfassen ließ, blieb die Zerkleinerung durch den Pflug unberücksichtigt. Für den Vergleich der Geräteeffekte hat dies keine Bedeutung, da alle Geräte die gleiche Ausgangssituation vorfanden; für die Berechnung des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes dagegen kann dieser Vorlockerungseffekt einen stärkeren Einfluß haben. Wenn der Zerkleinerungsgrad der Bestellgeräte korrigiert wird, indem man den Pflugeffekt subtrahiert, dann verschiebt sich der Versuchsbereich in einen niederen Bereich. Für einen großen Zerkleinerungsgrad von etwa 8 Einheiten wirkt sich eine Verminderung um 2 Einheiten weniger stark auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand aus als für einen kleinen Zerkleinerungsgrad von 4 Einheiten.

Der Zerkleinerungseffekt des Pfluges läßt sich indirekt durch die Fräse ermitteln, die auf gepflügten und ungepflügten Boden eingesetzt wurde. Bei gleicher Bissenlänge läßt sich aus der Differenz der beiden Zerkleinerungsgrade der Pflugeffekt errechnen. Mit den Daten der Tabelle 12, S. 56 wurden für den Scharpflug folgende Zerkleinerungsgrade errechnet:

Dürnast, Okt. 1972:	1,2
Dürnast, Nov. 1973:	0,2
Roggenstein, Okt. 1973:	3,5

Eine Korrektur des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes um diese Werte bringt kaum eine Verschiebung der Rangfolge der Geräte (Tab. 17), da die Unterschiede im Zerkleinerungsgrad nicht sehr groß sind. Lediglich der absolute Wert von Z_{spez} wurde etwas größer.

Tabelle 17: Korrigierter spezifischer Zerkleinerungsaufwand ($Z_{spez} \cdot 10^3$ in kJ/m^2) der Bestellgeräte

	Dürnast		Roggenstein
	Okt. 1972	Nov. 1973	Okt. 1973
Feingrubber	17,4	13,4	25,0
Rüttelegge	19,0	15,6	21,3
Fräse	27,4	38,6	29,4
Kreiselegge	28,0	53,6	58,7

Der geringe spezifische Zerkleinerungsaufwand des Feingrubber und der Rüttelegge beruht hauptsächlich auf dem geringen Leistungsaufwand zur Zerkleinerung. Die Kreiselegge und die Fräse konnten ihren relativ hohen Leistungsaufwand weder durch eine schnellere Fahrgeschwindigkeit (begrenzt durch die Leistung des Schleppers) ausgleichen noch durch eine feinere Zerkleinerung (begrenzt durch die Problemstellung des Versuches, nach der alle Geräte ein in etwa gleiches Krümelgemisch herstellen sollten).

Aus diesen Beziehungen kann eindeutig nachgewiesen werden, daß der Leistungsbedarf zur Zerkleinerung im Bereich der Versuchswerte den größten Einfluß auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand ausübt. Offen bleibt die Frage, ob die Steigerung der Fahrgeschwindigkeit unter den gegebenen Verhältnissen eine Verminderung des spezifischen

Zerkleinerungsaufwandes gebracht hätte, da der Einfluß der Fahrgeschwindigkeit auf den Leistungsaufwand nicht untersucht worden ist. Auch konnte der Einfluß der Arbeitsbreite auf den Leistungsaufwand nicht untersucht werden. Der relativ hohe Leistungsaufwand der Kreiselegge ließe sich eventuell bei einer nicht linearen Beziehung durch die größere Arbeitsbreite von 3 m gegenüber 2,5 m der anderen Geräte erklären. Die Beurteilung der Minimalbestellgeräte mit Hilfe des spezifischen Zerkleinerungsaufwandes kann deshalb nur mit einer gewissen Vorsicht angewandt werden. Wenn jedoch die Beziehungen zwischen Leistungsbedarf und allen Einflußgrößen - Arbeitsbreite, Arbeitstiefe, Fahrgeschwindigkeit und Zerkleinerungsgrad - untersucht worden sind, bietet sich der spezifische Zerkleinerungsaufwand als guter Maßstab zur Beurteilung der Geräte an.

Entscheidend für die Beurteilung eines Gerätes sind aber nicht nur die technischen Kriterien, sondern auch die Auswirkungen der Bodenzerkleinerung auf das Pflanzenwachstum. Der Anspruch der Pflanzen an die Beschaffenheit des Saatbettes ist sehr unterschiedlich. Es gibt zwar keine Angaben über optimale Krümelgemische, doch allgemeine Angaben existieren. So sollten kleine Saatkörner ein feineres Saatbett haben als große Körner. Ebenso beeinflußt die Stabilität des Bodens den notwendigen Zerkleinerungseffekt. Je stabiler die Bodenaggregate sind, desto feiner kann das Aggregatgemisch sein, ohne daß die Gefahr einer Verschlämmung besteht. Die Feinheit des Aggregatgemisches kann somit aus verschiedenen Gründen variiert werden. Wenn es gelingt, die Optimalbereiche der Pflanze für einen Bodentyp zu erfassen, würden die Geräte, die ihren Zerkleinerungseffekt variieren können, an Bedeutung gewinnen. Dies sind vor allem die zapfwellengetriebenen Geräte mit einem Getriebe.

Das Aggregatgemisch nach der Bearbeitung stellt die Ausgangsbasis für den Aufbau des Bodengefüges dar. Die Aggregatgrößenverteilung und die

Aneinanderlagerung der Aggregate bestimmen die Porengrößenverteilung und Durchlässigkeit. Da es für einige physikalische Bodeneigenschaften Optimalbereiche für das Pflanzenwachstum oder Schwellenwerte für ein optimales Wachstum gibt, ist es für eine pflanzenbauliche Interpretation des Zerkleinerungseffektes notwendig, gerade die physikalischen Bodeneigenschaften zu untersuchen. Zunächst werden daher im folgenden die physikalischen Bodeneigenschaften nach der unterschiedlichen Bearbeitung durch Bestellgeräte untersucht, ehe eine funktionale Beziehung zwischen Aggregatgrößenverteilung und physikalischen Bodeneigenschaften hergestellt wird.

4.4 Auswirkungen der Bodenbearbeitung auf die physikalischen Bodeneigenschaften

Das Pflügen und die Zerkleinerung des Bodens zur Saatbettbereitung lockern das Bodengefüge. Durch diese Lockerungsmaßnahmen werden die Grobporen angereichert. Unterschiedliche Auswirkungen der Bestellgeräte sind deshalb vor allem bei den Grobporen zu erwarten. Die Lockerung des Bodens gehört in den humiden Klimazonen Mitteleuropas zu den wichtigsten Aufgaben der Bodenbearbeitung. Das Problem liegt jedoch darin, daß der optimale Anteil der Grobporen nicht genau bekannt ist. Als Richtwert für ein ungestörtes Wachstum kann für mittelschwere Böden (Lehme) ein Bereich von 10 - 15 Vol% angenommen werden (BAVER 1949 (12), BOECKEL 1963 (19)). Dies ist ein Schwellenwert, der während der Vegetationsperiode nicht unterschritten werden sollte. Denn der Grobporenanteil beeinflußt zusammen mit der Durchlässigkeit die O_2/CO_2-Diffusion zwischen Bodenluft und Atmosphäre (KMOCH, MAZURAK, 1959 (67), WILLIAMSON 1964 (114), FRANKEN 1969 (43), CURRIE, 1970 (12)).

Doch nicht allein aus diesen Gründen ist die Erfassung der Grobporen von besonderer Bedeutung. Die Grobporen korrellieren nämlich sehr eng mit anderen Bodeneigenschaften, so daß bei Kenntnis der Zusammenhänge die Diskussion der Grobporen allein schon eine umfangreiche Information bietet. Einen Überblick über die Beziehungen der physikalischen Bodeneigenschaften in den Versuchsböden gibt Tabelle 18.

An den drei Versuchsstandorten ergaben sich die gleichen Zusammenhänge. Die Korrelation der Grobporen zu den kapillaren Poren ($\emptyset < 10\ \mu$) war negativ (r: -0,78; -0,82; -0,62), d.h. je höher der Anteil der Grobporen war, desto geringer war der Anteil der kapillaren Poren.

Tab. 18: Korrelation der Grobporen ($>10\ \mu$) mit einigen Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Tiefe

	Roggenstein (n = 540)	Frankendorf (n = 300)	Dürnast (n = 330)
Poren $<10\ \mu$ (Vol %)	-0,78	-0,82	-0,62
Porenvolumen (Vol %)	0,75	0,67	0,68
Luftgehalt* (Vol %)	0,89	0,80	0,92
Wassergehalt* (Vol %)	-0,67	-0,66	-0,71
Permeabilität (pk_a)	0,75	0,71	0,82

n = Anzahl der Wertepaare
* : bei der Probenahme

Entsprechend verhielt sich der Wassergehalt am Zeitpunkt der Probenahme zu den Grobporen (r: -0,67; -0,66; -0,71). Bei höherem Anteil der Grobporen war der Wassergehalt geringer. Eine positive Korrelation hatten die Grobporen zum Porenvolumen, zum Luftgehalt am Zeitpunkt der Probenahme und zur Permeabilität. Aus diesen Beziehungen folgt, daß der Anteil der Grobporen als Maßstab für die Lockerheit des Bodens herangezogen werden kann. Je höher der Anteil der Grobporen ist, desto höher sind auch der Luftgehalt, die Permeabilität und das Porenvolumen, während zugleich der Anteil der kapillaren Poren und der Wassergehalt umso geringer werden.

Die Lockerung des Bodens durch das Pflügen beschränkt sich auf eine Arbeitstiefe von ungefähr 25 cm, da die Hauptmasse der Wurzeln auf diesen Krumenraum verteilt ist. Die Wurzeln breiten sich aber je nach Tiefgründigkeit des Bodens über 2 m Tiefe aus. Da das Pflügen und Fräsen nicht nur den Boden lockert, sondern auch den Boden unter der Bearbeitungsgrenze verdichtet (Abb. 7, S.44), dürften die physikalischen Bodeneigenschaften unter der Bearbeitungsgrenze einen Einfluß auf das Pflanzenwachstum haben. Drei Bodenschichten werden deshalb

auf die Auswirkungen der Bearbeitungsmaßnahmen untersucht:

1. die Krumenoberfläche (0 - 10 cm)
2. der mittlere Krumenraum (10 - 20 cm)
3. der Unterboden (25 - 30 cm)

4.4.1 Bodengefüge an der Oberfläche

Die Bestellgeräte hinterlassen je nach Zerkleinerungsintensität an der Oberfläche der Krume ein unterschiedliches Aggregatgemisch, das sich auf die Aneinanderlagerung der Aggregate und den Aufbau des Bodengefüges auswirken sollte. Da zu Beginn der Versuche Okt. 1971 der Zerkleinerungseffekt der Geräte noch unbekannt war, wählte man aus arbeitstechnischen Gründen zur Stechzylinderuntersuchung die Geräte aus, die sich visuell in der Zerkleinerung unterschieden. Das waren als Vergleichsgerät die konventionelle Kombination, die Kreiselegge und der Feingrubber. Die Fräse auf gepflügtem und ungepflügtem Boden wurde ebenfalls in das Programm zur Untersuchung der Standardversuche aufgenommen. Die bodenphysikalischen Auswirkungen der Rüttelegge wurden in den ergänzenden Nebenversuchen erfaßt. Die Probenahme mit den Stechzylindern erfolgte zu drei Zeitpunkten: März, Juni, August.

Die Problematik der Stechzylinderprobenahme liegt im Zeitpunkt der Probenahme. Einerseits ist im Herbst direkt nach der Bearbeitung der Boden für eine Stechzylinderprobenahme zu locker, andererseits verändern Witterungseinflüsse zwischen Bearbeitung und Probenahme das Bodengefüge. Die Witterung kann sowohl das Bodengefüge auflokkern als auch verdichten. Langfristig macht das Bodengefüge einen Setzungsprozeß durch, kurzfristig kann dieser Prozeß durch eine witterungsbedingte Lockerung unterbrochen werden. Die Dynamik der

Grobporen zeigte in den Jahren 1972 und 1973 zwei typische Beispiele für eine unterschiedliche Entwicklung. In der Vegetationsperiode 1972 verminderte sich der Grobporenanteil kontinuierlich, in der Vegetationsperiode 1973 wurde dagegen der Setzungsprozeß durch eine Lockerungsphase zwischen April und Juni unterbrochen. Bei derart starken Einflüssen der Witterung stellt sich die Frage, ob diese Einflüsse gerätebedingte Unterschiede egalisierten oder verstärkten. Der F-Wert einer Varianzanalyse, der die Wechselwirkungen zwischen den Bestellgeräten und dem Zeitpunkt der Probenahme erfaßt, kann darüber Auskunft geben. So weist ein signifikanter F-Wert auf eine unterschiedliche Veränderung des Bodengefüges bei den einzelnen Bestellverfahren in der Zeit zwischen den Probenahmen hin.

Die F-Werte einiger Bodeneigenschaften zeigten an den Versuchsstandorten eine unterschiedliche Signifikanz. In Roggenstein traten keine Wechselwirkungen auf, in Frankendorf bei den Poren $< 10\ \mu$ und in Dürnast bei den Poren $< 10\ \mu$ und den Poren $> 10\ \mu$ (Tab. 19).

Tabelle 19: F-Wert zur Beurteilung der Wechselwirkungen zwischen den Bestellgeräten und dem Zeitpunkt der Probenahme.

Merkmal	Roggenstein	Frankendorf	Dürnast
Porenvolumen	2,01 ns	2,40 ns	0,06 ns
Poren $> 10\ \mu$	2,02 ns	1,12 ns	3,93
Poren $< 10\ \mu$	1,18 ns	3,01	4,24
Permeabilität	2,35 ns	1,51 ns	1,99 ns
Signifikanz bei	3,30	2,55	2,90

ns = nicht signifikant

Da die meisten F-Werte nicht signifikant waren, die anderen nur wenig über der Signifikanzschwelle lagen, kann man annehmen, daß Unterschiede, die zwischen den Geräten bezüglich der physikalischen Bodeneigenschaften auftraten, erhalten blieben oder nur geringfügig verändert wurden.

Die Dynamik des Bodengefüges und die Relation der einzelnen Bestellverfahren zueinander soll an Hand der Grobporenanteile zu den Probenahmeterminen dargestellt werden (Abb. 17 bis 19). Aus der Vielzahl der Geräte sollen vorerst nur die Geräte, die den geringsten und höchsten Grobporenanteil erzeugt haben, diskutiert werden. Besondere Aufmerksamkeit erfahren auch die Auswirkungen der Fräse auf ungepflügten Parzellen.

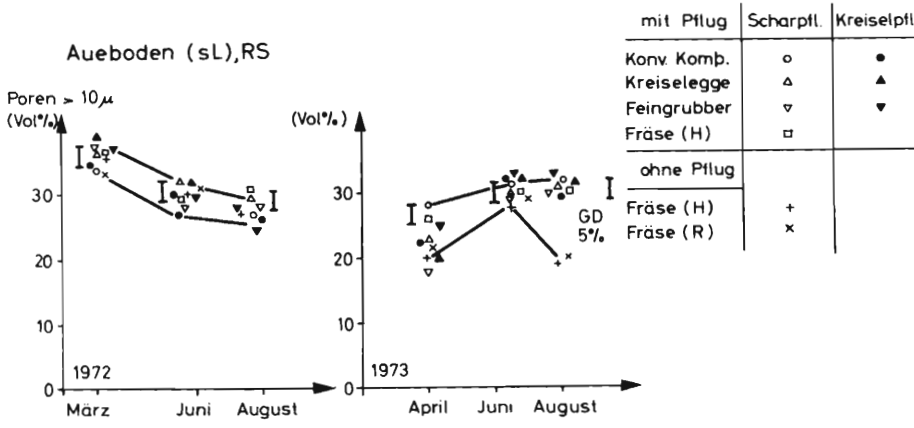

Abb. 17: Grobporenanteil im Bodengefüge nach unterschiedlicher Bearbeitung (Roggenstein).

In Roggenstein hatte im Jahre 1972 die konventionelle Kombination (o) zu jedem Zeitpunkt den geringsten Grobporenanteil, die Kreiselegge (▲) den höchsten erzeugt. Der Anteil der anderen Geräte lag zwischen

diesen beiden Extremwerten. Auch die Grobporen der Fräsparzellen (+,x) lagen im Bereich der anderen Geräte. Im Jahre 1973 lag der Anteil der Fräsparzellen an der unteren Grenze der Streubreite. Nach der Lockerungsphase zwischen April und Juni war der Unterschied geringer, aber bis August 1973 hatte sich das Bodengefüge der ungepflügten Parzellen stärker gesetzt als das der gepflügten. Im Juni und August war die Streubreite der Grobporenanteile - ausgenommen die ungepflügten Fräsparzellen (x,+) - nur wenig größer als die Grenzdifferenz, d.h. die auftretenden Unterschiede waren nur sehr gering. An den anderen Standorten ist eine ähnliche Abstufung der Geräte zu beobachten.

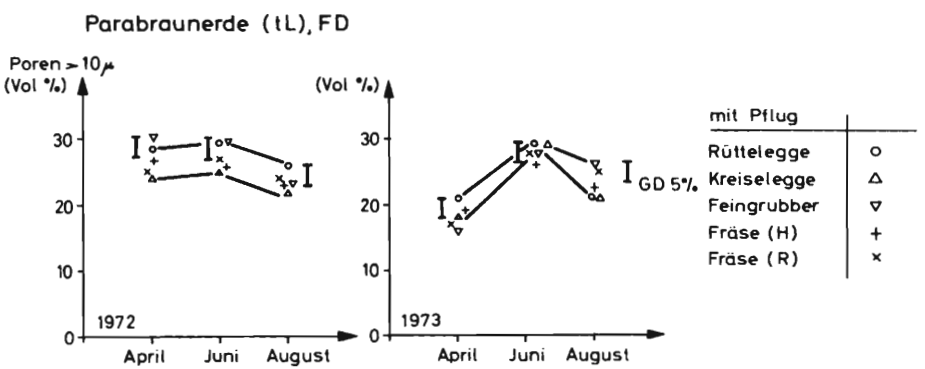

Abb. 18: Grobporenanteil im Bodengefüge nach unterschiedlicher Bearbeitung (Frankendorf)

In Frankendorf waren die Bestellgeräte nur auf der Pflugfurche eingesetzt worden. Im Jahre 1972 kristallisierte sich die Kreiselegge (▲) mit dem geringsten Grobporenanteil heraus, die Rüttelegge (o) und der Feingrubber (▼) mit dem größten Anteil. Im Jahre 1973

hatte die Rüttelegge im April und Juni zwar wiederum mit den größten Grobporenanteil, bis August verminderte sich dieser Anteil etwas stärker als der Anteil von Feingrubber (▽) und Fräse (x). Auch hier war die Streubreite der Grobporenanteile nur wenig größer als die Grenzdifferenz.

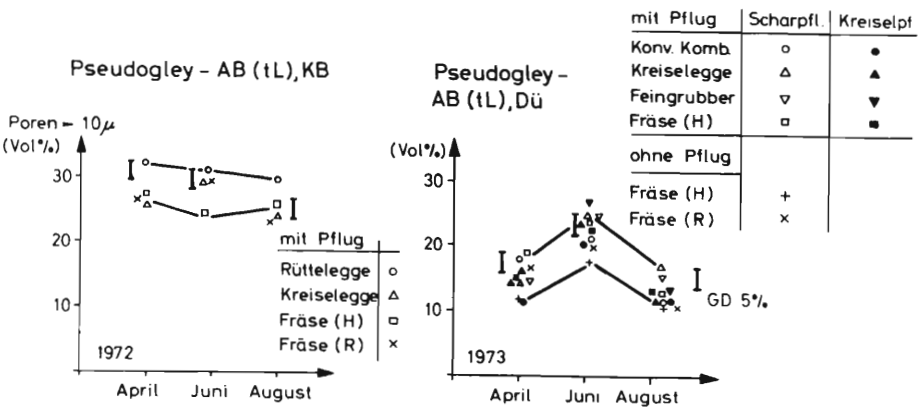

Abb. 19: Grobporenanteil im Bodengefüge nach unterschiedlicher Bearbeitung (Kranzberg/Dürnast)

In Kranzberg war ein Vorversuch für den langjährigen Dauerversuch in Dürnast angelegt worden. Für die Vegetationsperioden 1972 und 1973 ergaben sich folgende Ergebnisse (Abb. 19).

Der Vorversuch in Kranzberg zeigte ähnliche Relationen wie in Frankendorf. Die Rüttelegge (o) hatte zu jedem Zeitpunkt den höchsten Grobporenanteil, die Kreiselegge (Δ) und die Fräse (H) (□) lagen im unteren Grenzbereich. 1973 in Dürnast hatte das Bodengefüge nach dem Fräsen auf ungepflügtem Boden(+,x) das geringste Grobporenniveau; die obere Begrenzung stellte zunächst im April die Fräse (□), im Juni der Feingrubber (▽) und im August die Kreiselegge (Δ)

dar. Hier ist der Wechsel zwischen den Geräten etwas ausgeprägter. Die Dynamik der ungepflügten Fräsparzellen (+,x) verlief jedoch parallel zu den gepflügten Paazellen.

Zusammenfassend läßt sich über die unterschiedliche Veränderung des Grobporenanteils nach den einzelnen Bestellverfahren folgendes sagen:

1. Die Dynamik der Grobporen war an den einzelnen Standorten und auf den verschiedenen Bearbeitungsparzellen gleich.
2. Die Unterschiede auf den gepflügten Parzellen waren sehr gering. Die Spannbreite entsprach in etwa der doppelten Grenzdifferenz.
3. Die Fräsen hatten auf den ungepflügten Parzellen ein geringeres Grobporenniveau erzeugt als die Bestellgeräte nach dem Pflügen.
4. Im Verlauf der Vegetationsperiode kann im Bodengefüge der gefrästen Parzellen keine stärkere Grobporenabnahme festgestellt werden. Das würde bedeuten, daß die Zerkleinerung durch die Fräse keine strukturinstabile Wirkung hat.

In Roggenstein waren zu den Zeitpunkten der Probenahme Werte zwischen 20 und 35 Vol% gemessen worden, in Frankendorf Werte zwischen 15 und 25 Vol%. Das Grobporenniveau der Versuchsböden lag sowohl in Roggenstein als auch in Frankendorf in einem Bereich, der eine ausreichende O_2-Versorgung der Wurzeln sicherstellt. In Dürnast dagegen lagen die Grobporen nur zwischen 10 und 25 Vol%, d. h. unter ungünstigen Witterungsbedingungen könnte auf den Parzellen mit geringem Grobporenanteil ($<$ 15 Vol%) die O_2-Versorgung gestört werden. Es ist deshalb notwendig, zunächst die Auswirkungen der einzelnen Bodenbearbeitungsgeräte ausführlicher zu untersuchen, dann Beziehungen zwischen dem Zerkleinerungseffekt der Geräte und den physikalischen Bodeneigenschaften herzustellen, um eventuell den Zerkleinerungseffekt der Geräte pflanzenbaulichen Anfor-

derungen an das Bodengefüge anzupassen.

Voraussetzung für den Einsatz der Bestellgeräte ist das Pflügen (eine Ausnahme stellen die Fräse und Direktsaatmaschine dar). Deshalb soll zunächst der Einfluß der Pflugvorarbeit auf den Arbeitseffekt der Bestellgeräte betrachtet werden, ehe die Auswirkungen der Bestellgeräte selbst dargestellt werden.

1. Einfluß von Schar-und Kreiselpflug auf die Auswirkungen der Bestellgeräte.

   Der Effekt von drei Bestellgeräten (konventionelle Gerätekombination, Kreiselegge und Feingrubber) wurde sowohl auf den Scharpflugparzellen als auch auf den Kreiselpflugparzellen untersucht. Da die Wechselwirkung zwischen den Geräten der Oberflächenbearbeitung und Grundbodenbearbeitung bei fast allen ermittelten Bodeneigenschaften nicht signifikant waren (Tab. 5, S. 34), kann der Durchschnittswert der drei Bestellgeräte verglichen werden. In Tabelle 20 sind die physikalischen Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Tiefe nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung aufgeführt.

   Ein erster Überblick zeigt, daß Unterschiede beim Porenvolumen, bei den Poren $<10\ \mu$, bei den Poren 10 - 50 μ und beim Wassergehalt auftraten. Das Bodengefüge der Kreiselpflugparzellen hatte ein etwas höheres Porenvolumen von 50,4 gegenüber 49,7 % auf den Scharpflugparzellen. Der Anteil der Poren $>10\ \mu$ war zwar im Durchschnitt gleich hoch (25,8 gegenüber 25,7 Vol%), aber in Dürnast war der Grobporenanteil der Scharpflugparzelle um 1,2 Vol% höher. Auch bei den Poren 10 - 50 μ war auf den Scharpflugparzellen der Anteil höher.

Tabelle 20: Einfluß von Schar- und Kreiselpflug auf physikalische Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Tiefe.
(Durchschnitt von 3 Probenahmen/Jahr)

		Scharpflug	Kreiselpflug	GD 5 %
Porenvolumen (Vol %)	RS 1972	50,1 a	51,7 a	
	RS 1973	51,1 a	51,2 a	0,99
	DÜ 1973	48,0 a	48,4 a	
	Durchschnitt	49,7 a	50,4 b	0,57 (x)
Poren > 10 µ (Vol %)	RS 1972	31,1 a	31,2 a	
	RS 1973	28,3 a	29,0 a	1,06
	DÜ 1973	18,0 a	16,8 b	
	Durchschnitt	25,8 a	25,7 a	0,61
Poren < 10 µ (Vol %)	RS 1972	19,0 a	20,5 b	
	RS 1973	22,8 a	22,2 a	0,90
	DÜ 1973	30,0 a	31,6 b	
	Durchschnitt	23,9 a	24,8 b	0,52 (x)
Poren 10-50 µ (Vol%)	RS 1972	5,1 a	4,7 b	
	RS 1973	5,4 a	4,8 b	0,24
	DÜ 1973	4,7 a	4,1 b	
	Durchschnitt	5,1 a	4,5 b	0,14 (x)
Luftpermeabilität (lg μ^2)	RS 1972	1,8 a	1,9 a	
	RS 1973	1,6 a	1,6 a	0,12
	DÜ 1973	0,8 a	0,8 a	
	Durchschnitt	1,4 a	1,4 a	0,07
Luftgehalt b. Probenahme (Vol %)	RS 1972	31,3 a	32,6 b	
	RS 1973	30,8 a	31,4 a	1,06
	DÜ 1973	19,3 a	18,1 b	
	Durchschnitt	27,1 a	27,4 a	0,61
Wassergehalt b. Probenahme (Vol%)	RS 1972	18,8 a	19,2 a	
	RS 1973	20,4 a	19,8 a	0,86
	DÜ 1973	28,7 a	30,3 b	
	Durchschnitt	22,6 a	23,1 b	0,50 (x)

(x): signifikanter Unterschied
RS : Roggenstein
DÜ : Dürnast

Umgekehrt war das Verhältnis bei den kapillaren Poren ($< 10\,\mu$). Hier hatten die Kreiselpflugparzellen einen um etwa 1 Vol% höheren Anteil. Diese geringen Unterschiede in der Porengrößenverteilung wiederholten sich bei der Permeabilität, die auf beiden Parzellen mit 1,4 (lg μ^2) im Bereich mittlerer Durchlässigkeit lag. Entsprechend der Porenanteile waren Luftgehalt und Wassergehalt zum Zeitpunkt der Probenahme ebenfalls nahezu gleich. In Dürnast konnte zwar auf den Scharpflugparzellen ein geringfügig höherer Luftgehalt (19,3 gegenüber 18,1 Vol%) gemessen werden, im Wassergehalt ein etwas geringerer Anteil (28,7 gegenüber 30,3 Vol%), aber im Durchschnitt waren auch diese Bodeneigenschaften nahezu gleich. Auf die Pflanze haben derart geringe Unterschiede keine diffenzierende Wirkung. Es wiederholt sich die bereits bei der Zerkleinerung gemachte Beobachtung, daß der Schar- und Kreiselpflug keinen unterschiedlichen Einfluß auf den Effekt der Bestellgeräte ausüben.

Bei der angewandten Methodik war es nicht möglich, den Effekt des Pflügens direkt zu messen. Er läßt sich jedoch durch ein Gegenüberstellen der Fräsparzellen abschätzen, da die Fräse als einziges Gerät sowohl auf gepflügten als auch ungepflügten Boden eingesetzt wurde. In Abb. 20 sind die wichtigsten Bodeneigenschaften der gefrästen Krume nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung dargestellt.

Eine vorausgegangene Grundbodenbearbeitung erhöhte die Porosität der bearbeiteten Oberfläche. Sowohl in Roggenstein als auch in Dürnast war auf den gepflügten Parzellen das Bodengefüge lockerer als auf ungepflügten. Das Pflügen erhöhte den Grobporenanteil um 3 - 5 Vol% und verminderte den Anteil kapillarer Poren um den gleichen Wert. Noch deutlicher trat die

bessere Lockerung bei der Luftpermeabilität hervor. In Roggenstein lag der Koeffizient mit 1,9 (lg μ^2) im Bereich guter Durchlässigkeit, während er nach Fräsen allein mit pk_a = 1,4 im Bereich mittlerer Durchlässigkeit lag. In Dürnast fiel die Luftpermeabilität bei einem Verzicht auf das Pflügen sogar vom Bereich geringer (pk_a = 1,0) in den Bereich sehr geringer Durchlässigkeit (pk_a = 0,2).

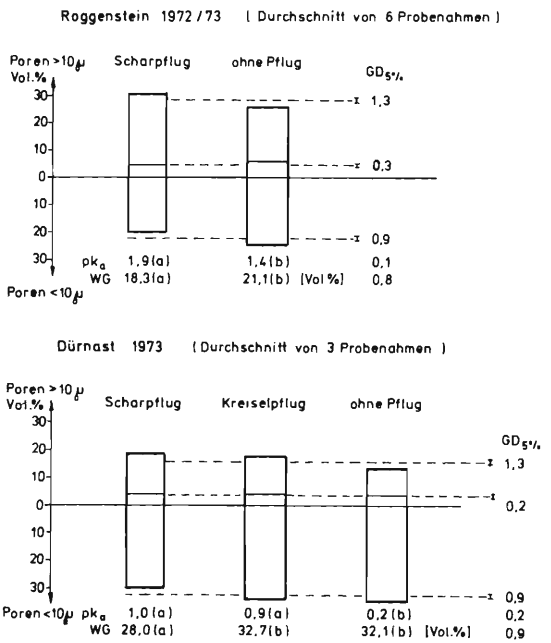

Abb. 20: Einfluß des Pflügens auf den Effekt der Fräse

Da der Wassergehalt sehr eng mit dem Anteil der kapillaren Poren korreliert, war der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Probenahme auf den mit dem Scharpflug gepflügten Parzellen immer niedriger als auf den gefrästen Parzellen. Auf den mit dem Kreiselpflug gepflügten Parzellen hatte der Wassergehalt auf

Grund des höheren Anteils an kapillaren Poren ebenfalls einen höheren Wert (32,7 gegenüber 28,0 Vol%).

2. Auswirkungen der Bestellgeräte auf das Bodengefüge

Da einerseits Schar- und Kreiselpflug den Effekt der Bestellgeräte nicht unterschiedlich beeinflußt haben, andererseits der Scharpflug in der landwirtschaftlichen Praxis das häufigste Gerät der Grundbodenbearbeitung ist, dürften die bodenphysikalischen Auswirkungen der Minimalbestellgeräte auf konventionell gepflügtem Boden besonderes Interesse wecken. In den Abbildungen 21 und 22 sind die physikalischen Bodeneigenschaften nach der Bearbeitung mit den Bestellgeräten für die drei Versuchsstandorte dargestellt.

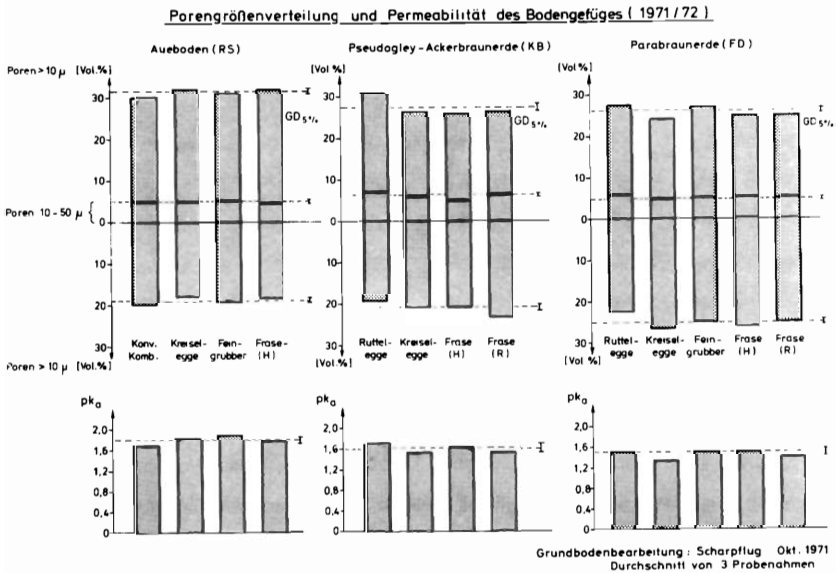

Abb. 21: Porengrößenverteilung und Permeabilität des Bodengefüges nach verschiedenen Bestellgeräten (1971/72) in 0 -10 cm Bodentiefe.

In der Wachstumsperiode 1971/72 muß man in dem Aueboden zunächst das dichtere Gefüge auf der Parzelle des konventionellen Bestellverfahrens beachten. Im Vergleich zur konventionellen Kombination hatten die Kreiselegge, der Feingrubber und die Fräse ein etwas lockeres Bodengefüge erzeugt. Nach zwei Arbeitsgängen mit der konventionellen Eggenkombination zur Saatbettbereitung und einem dritten Arbeitsgang zum Säen war auf diesen Parzellen ein geringerer Grobporenanteil und eine geringere Luftpermeabilität vorhanden. Zugleich war der Anteil der kapillaren Poren erhöht worden. Die Verdichtungserscheinungen können nur darauf zurückzuführen sein, daß sich das mehrmalige Befahren trotz nachfolgender Lockerung und Krümelung durch Eggenzinken und Drahtwälzegge auch auf die Oberflächenstruktur auswirkt.

Unter dem Druck des Rades wurden nämlich die Grobporen auch innerhalb der Aggregate komprimiert, so daß trotz Aufreißens der Spur der Anteil der Grobporen geringer ausfiel. Daß bei der Stechzylinderprobenahme auch direkt ungelockerte Spuren erfaßt wurden, ließ sich nicht verhindern und trug zu diesem Ergebnis bei.

In der Pseudogley-Ackerbraunerde und der Parabraunerde war die konventionelle Bestellung nicht durchgeführt worden, so daß man als Bezugsniveau nur den Mittelwert heranziehen kann. In der Pseudogley-Ackerbraunerde fiel die Rüttelegge durch den überdurchschnittlichen Grobporenanteil auf. Der Anteil der kapillaren Poren lag unter dem Durchschnitt. Bei der Permeabilität treten keine Unterschiede auf.

In der Parabraunerde hatte die Rüttelegge neben dem Feingrubber wiederum einen höheren Grobporenanteil und geringeren Anteil

kapillarer Poren im Bodengefüge der Krumenoberfläche (0 - 10 cm) erzeugt. Unterschiede in der Permeabilität traten nicht auf.

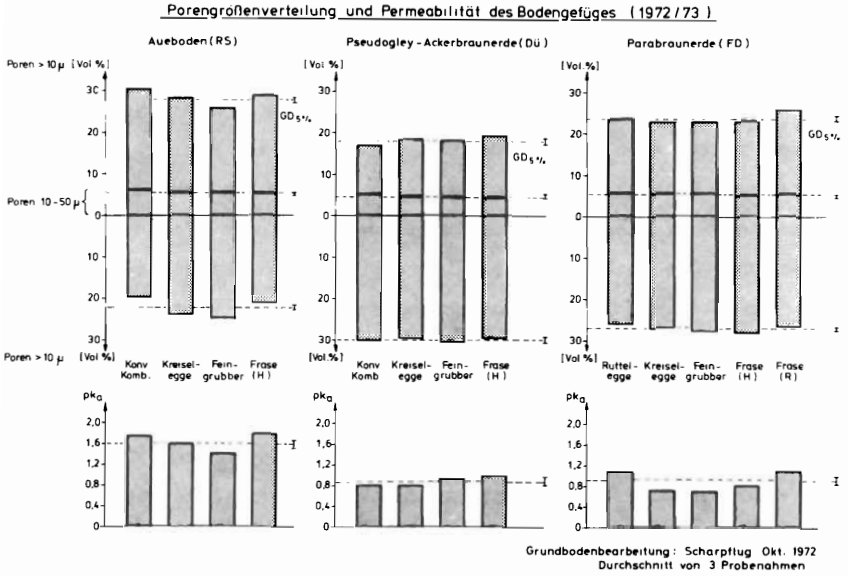

Abb. 22: Porengrößenverteilung und Permeabilität des Bodengefüges nach verschiedenen Bestellgeräten (1972/73) in 0 - 10 cm Bodentiefe.

In der Waschstumsperiode 1972/73 wiederholten sich nur zum Teil die Ergebnisse des Vorjahrs. So hatte in dem Aueboden das konventionelle Bestellverfahren einen über dem Durchschnitt liegenden Grobporenanteil erzeugt. Dieses Ergebnis muß jedoch ausgeklammert werden, da das Teilstück der Versuchsfläche, auf dem die konventionelle Gerätekombination eingesetzt worden war, einen höheren Stein- und Sandgehalt hatte, der sich bei der Probenahme darin äußerte, daß des öfteren Bodenteilchen aus dem Stechzylinder herausfielen. Auffallend ist die starke Abweichung des Feingrubbers, der einen geringeren Grobporenanteil und auch

eine geringere Permeabilität erzeugt hatte als die Fräse und die Kreiselegge. Entgegengesetzt zum Grobporenanteil lag der Anteil der kapillaren Poren der Feingrubberparzelle über dem Durchschnitt.

In der Pseudogley-Ackerbraunerde hatte dagegen das konventionelle Bestellverfahren wiederum ein dichteres Gefüge erzeugt. Sowohl der Grobporenanteil als auch die Luftpermeabilität lag unter dem Ortsdurchschnitt, d.h. die Minimalbestellgeräte hatten eine größere Lockerheit erzeugt. Zwischen den Minimalbestellgeräten selbst konnte keine Abstufung festgestellt werden.

Auch in der Parabraunerde trat zwischen den Minimalbestellgeräten kein großer Unterschied auf. Als einziges Gerät setzte sich die Fräse (R) durch einen höheren Grobporenanteil von den anderen Geräten ab. Eine bessere Permeabilität war nach der Fräse (R), aber auch nach der Rüttelegge zu beobachten.

Zusammenfassend kann über die Wirkung der Minimalbestellgeräte gesagt werden, daß sie in den niederschlagsarmen Vegetationsperioden stets ein Bodengefüge erzeugt haben, das sich von dem Bodengefüge der konventionell bestellten Flächen geringfügig durch eine größere Lockerheit unterschied. Die Rüttelegge hatte gegenüber den anderen Geräten meist einen höheren Grobporenanteil und eine höhere Permeabilität im Bodengefüge erzeugt.

Kann man auf Grund dieser Ergebnisse auch keine Aussagen über die Auswirkungen der Bearbeitung auf den Ertrag machen, so kann man doch behaupten, daß die Minimalbestellgeräte nach vorausgegangener Pflugfurche für das Pflanzenwachstum zumindest kein nachteiliges Bodengefüge erzeugt haben. Im Gegenteil, unter humiden Klimaeinflüssen kann ein Bodengefüge mit einer größeren

Lockerheit nur von Vorteil sein.

Wenn auch die für die Pflanze optimalen Bereiche der physikalischen Bodeneigenschaften noch nicht genau abgegrenzt sind, so wird man doch in Zukunft auf die Bereitung eines optimalen Saatbettes größere Aufmerksamkeit verwenden. Um aber ein optimales Bodengefüge herzurichten, ist es unumgänglich, die Beziehungen zwischen dem Zerkleinerungseffekt und den physikalischen Bodeneigenschaften zu kennen.

3. Einfluß des Aggregatgemisches auf physikalische Bodeneigenschaften

Bei der Darstellung vorausgegangener Ergebnisse fiel auf, daß die Rüttelegge mit dem feinsten Zerkleinerungseffekt das lockerste Bodengefüge aufgebaut hat, die Fräsen auf den ungepflügten Flächen mit der gröbsten Zerkleinerung das dichteste Bodengefüge. Im folgenden soll die Beziehung zwischen der Aggregatgrößenverteilung und den Grobporen bzw. den kapillaren Poren näher untersucht werden.

Die kapillaren Poren entstehen durch die Aneinanderlagerung der primären Bodenteilchen, wie Ton, Schluff und Sand; die Grobporen entstehen durch die Aneinanderlagerung von Bodenaggregaten oder Sandkörnern mit größerem Durchmesser. Um diese Zusammenhänge in Verbindung mit der Bodenbearbeitung zu erklären, wurden die einzelnen Aggregatgrößen und der Gewogene Mittlere Durchmesser mit den Grobporen und kapillaren Poren korreliert. Für die Porengrößen wurde der Durchschnitt der drei Probenahmen (April, Juni, August) genommen, für die Aggregatgrößenverteilung die Ergebnisse von Oktober 1972 bzw. März 1973. Tabelle 21 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen dem Anteil der

Grobporen und den einzelnen Aggregatfraktionen für die drei Versuchsstandorte.

Tabelle 21: Korrelationskoeffizienten zwischen dem Anteil der Aggregatgrößen bzw. Gewogenem Mittleren Durchmesser (GMD) und dem Anteil der Grobporen

Aggregatgröße (Ø in mm)	Roggenstein (n = 9)	Dürnast (n = 10)	Frankendorf (n = 5)
> 40	- 0,75	- 0,27 ns	---
20/40	- 0,80	0,24 ns	- 0,16 ns
10/20	0,52 ns	0,37 ns	0,43 ns
5/10	0,86	0,46 ns	- 0,15 ns
3/5	0,90	0,47 ns	- 0,22 ns
2/3	0,86	0,25 ns	- 0,02 ns
< 2	0,87	0,38 ns	- 0,15 ns
GMD	- 0,85	- 0,26 ns	- 0,15 ns

ns: nicht signifikant
$\alpha = 5\ \%$

Die Korrelation war nur in Roggenstein statistisch abzusichern, in Dürnast und Frankendorf ist die Korrelation zu schwach. Dürnast ließe sich bei der Diskussion der Ergebnisse von Roggenstein mit einschließen, da die Vorzeichen der Koeffizienten beider Orte gleich waren. Frankendorf fällt dagegen von diesen beiden Orten ab, sei es, daß bei der Frühjahrsbestellung die Frostgare eine größere Rolle spielte, sei es, daß die Anzahl der Wiederholungen zu gering war.

Zwei Tendenzen fallen bei dem Korrelationskoeffizienten auf:

a) die großen Aggregate (> 20 mm) hatten eine negative Korrelation zu den Grobporen,

b) die kleinen Aggregate (< 10 mm) hatten eine positive Korrelation zu den Grobporen.

Die Zwischengröße 10 - 20 mm hatte einen nicht gesicherten Einfluß. Der Gewogene Mittlere Durchmesser hatte wegen seiner engen Korrelation zu den größten Aggregaten (z.B. in Roggenstein r = 0,9) eine negative Korrelation. Auf Grund der Vorzeichen kann man sagen, daß mit Zunahme der kleinen Aggregatgrößen der Grobporenanteil größer wurde, mit Zunahme der großen Aggregate dagegen kleiner. Einen Überblick über die Güte der Beziehung gibt die Abb. 23. Die Variationsbreite der Aggregate 3 - 5 mm wird vor allem durch die geringere Zerkleinerung der Fräsen hervorgerufen, während die anderen Geräte sehr eng zusammenliegen.

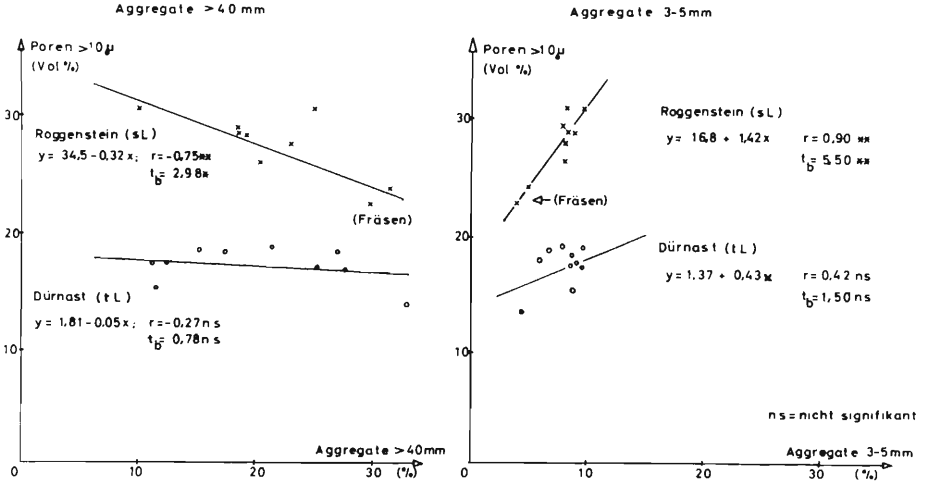

Abb. 23: Beziehung zwischen dem Anteil zweier Aggregatgrößen und dem Anteil der Grobporen.

In Roggenstein lag der Grobporenteil um 5 bis 15 Vol% höher als in Dürnast. Während sich jedoch in dem sandigen Lehm von Roggenstein die Variationsbreite über 10 Vol% erstreckte, waren es im tonigen Lehm nur 5 Vol%. So verläuft die Steigung der Geraden zwar gleichsinnig, aber eine statistische Absicherung ist nur für die Daten von Roggenstein möglich. Die egalisierende Wirkung des verdichtungsanfälligen Bodens in Dürnast wird bei umseitiger Abbildung sehr deutlich. Ob über eine unterschiedliche Zerkleinerung der Grobporenanteil in einem solchen Boden variiert werden kann, kann nicht geklärt werden.

Da die Beziehung zwischen den Grobporen und kapillaren Poren gegenläufig ist, kehren sich demzufolge die Beziehungen der kapillaren Poren zu den einzelnen Aggregatgrößen um (Tab.22).

Tabelle 22: Korrelationskoeffizienten zwischen dem Anteil der Aggregatgrößen bzw. dem Gewogenen Mittleren Durchmesser (GMD) und dem Anteil der kapillaren Poren

Aggregatgröße Ø in mm	Roggenstein (n = 9)	Dürnast (n = 10)	Frankendorf (n = 5)
> 40	0,69	0,54 ns	-
20/40	0,70	0,28 ns	- 0,42 ns
10/20	- 0,53 ns	- 0,63	- 0,74 ns
5/10	- 0,60 ns	- 0,45 ns	- 0,36 ns
3/ 5	- 0,70	- 0,46 ns	- 0,05 ns
2/ 3	- 0,79	- 0,35 ns	0,20 ns
< 2	- 0,84	- 0,39 ns	0,50 ns
GMD	- 0,76	- 0,48 ns	- 0,44 ns

ns: nicht signifikant $\alpha = 5\ \%$

Es bestätigt sich, daß die kapillaren Poren in Roggenstein einen positiven Korrelationskoeffizienten zu den Aggregaten >40 und 20/40 mm hatten. Zu den Aggregatgrößen <20 mm war die Beziehung negativ. Auch hier wiederholt sich die nicht abzusichernde Beziehung für die beiden anderen Standorte.

Auf Grund der Korrelationen kann man nun annehmen, daß unter gegebenen Bedingungen im Bereich des Gewogenen Mittleren Durchmessers zwischen 15 und 30 mm mit kleiner werdendem Durchmesser der Anteil der Grobporen zunimmt und zugleich der Anteil der kapillaren Poren zurückgeht, d.h. eine Zerkleinerung der Aggregate >20 mm, in denen meist kapillare Poren vorhanden sind, erhöht den Grobporenanteil.

Während die einzelnen Bestellverfahren auf gepflügtem Boden einen für das Pflanzenwachstum ausreichenden Grobporenanteil geschaffen haben, hatte die Fräse auf ungepflügtem Boden einen relativ geringen Grobporenanteil hinterlassen (Abb. 20, S. 89), d.h. sie hatte den Boden zu grob zerkleinert. Durch Verringerung der Bissenlänge müßte hier die Zerkleinerungsintensität gesteigert werden.

Das Herrichten des Saatbettes mit den Bestellgeräten ist für die Keimung des Saatgutes ausschlaggebend, für eine günstige Wurzelausbreitung ist aber das Bodengefüge unter dem Saatbett von nicht minderer Bedeutung. Da sich das Bodengefüge der Krume im Laufe eines Jahres setzt, sei es durch natürliche Setzungsvorgänge, sei es durch Befahren des Ackers zur Erntezeit, ist es notwendig, den Boden zu lockern. Das Pflügen der Krume war bisher eine Voraussetzung für eine optimale Pflanzenentwicklung. Da einerseits der Leistungs- und Zeitaufwand für das Pflügen sehr hoch ist, andererseits biologische Lockerungserschei-

nungen aufgetreten sind, versucht man den konventionellen Scharpflug zu ersetzen oder gänzlich auf ihn zu verzichten. In dieser Arbeit wurden daher ebenfalls die Auswirkungen des Kreiselpfluges und eines Pflugverzichtes beim Fräsen neben dem konventionellen Scharpflug untersucht.

Im nächsten Kapitel werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Grundbodenbearbeitungsverfahren auf die physikalischen Bodeneigenschaften in mittlerer Krumentiefe dargestellt.

4.4.2 Bodengefüge in mittlerer Krumentiefe (10 - 20 cm)

Eine Stechzylinderprobenahme direkt nach dem Pflügen erwies sich als zu schwierig, da der Boden zu locker und zu heterogen war. Deshalb wurde der Einfluß der Grundbodenbearbeitung zu Beginn des Frühjahrs und nach Ablauf der Vegetationsperiode untersucht. In Abb. 24 und 25 sind die Strukturverhältnisse in der Bodentiefe von 10 - 20 cm für zwei Vegetationsperioden dargestellt; zunächst im Oktober 1972 und Oktober 1973 vor dem Pflügen bzw. Fräsen, dann im April 1973 und April 1974 sechs Monate nach dem Pflügen bzw. Fräsen und Bestellen des Winterweizens. Die Veränderung des Bodengefüges zwischen den Untersuchungszeitpunkten wird in Abb. 24 und 25 als Funktion der Zeit aufgezeichnet, die zu den Bearbeitungsterminen unterbrochen wird. Eine direkte Verbindung der Meßpunkte ist von Natur aus nicht richtig, da in einem Zeitraum von 6 Monaten die Dynamik des Bodengefüges nicht geradlinig verläuft, auch wenn im unteren Krumenraum die Schwankungen nicht so groß sind wie an der Oberfläche unter dem direkten Einfluß der Witterung. Trotzdem wurde diese Form der Darstellung gewählt, da neben der Wirkung der Grundbodenbearbeitung die Änderung des Bodengefüges am Anfang und am Ende der Vegetationsperiode gegenübergestellt werden kann.

In Roggenstein lag das Grobporenniveau zwischen 12 und 20 Vol%, das Niveau der kapillaren Poren schwankte nur zwischen 25 und 28 Vol% (Abb. 24). Beim Fräsen ohne Pflügen hatte sich das Bodengefüge im mittleren Krumenraum gesetzt. Der Grobporenanteil änderte sich im Verlauf der drei Jahre nur wenig. Im Oktober 1972 lag er bei 14 Vol%, im April 1974 bei 12 Vol%. Nach der Grundbodenbearbeitung war der Anteil der Grobporen um 5 - 10 Vol% höher als bei einem Verzicht des Pflügens. Der Unterschied zwischen den Pflugtypen ist statistisch eindeutig gesichert. Im Frühjahr lag der Grobporenanteil der Kreiselpflugparzelle stets um 5 Vol% über dem der Scharpflugparzelle. Bis zum Ende der Vegetationsperiode 1973 (Oktober) hatten sich die Unterschiede ausgeglichen, während im niederschlagsarmen Jahr 1972 die größere Lockerheit der Kreiselpflugflächen erhalten geblieben war.

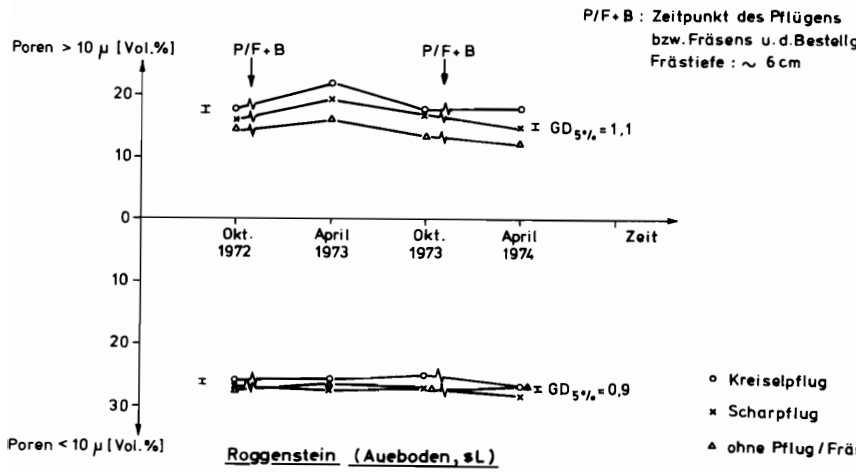

Abb. 24: Porengrößenverteilung in 10 - 20 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung (Roggenstein)

In Dürnast war das Bodengefüge allgemein etwas dichter (Abb. 25). Der Grobporenanteil lag zwischen 8 und 15 Vol.%, die kapillaren Poren zwischen 30 und 40 Vol.%. Die Ergebnisse von Roggenstein wiederholten sich nur zum Teil. Durch die Grundbodenbearbeitung wurde zwar das Bodengefüge gelockert, doch ein Unterschied bei den Grobporen zwischen Schar- und Kreiselpflug war nicht vorhanden. Auf den gefrästen Flächen hatte sich das Grobporenniveau auf etwa 10 Vol.% eingestellt.

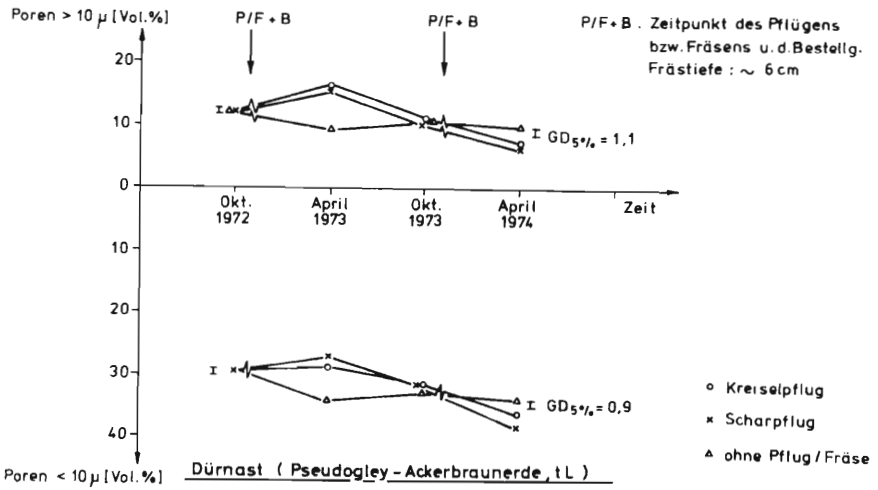

Abb. 25: Porengrößenverteilung in 10 - 20 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung (Dürnast).

Im April 1974 lag der Grobporenanteil der gepflügten Flächen unter dem der ungepflügten Fläche. Daß der Lockerungseffekt nach der Bestellung im November 1973 verloren gegangen war, ist auf den ungünstigen Bodenzustand zum Zeitpunkt der Winterweizenbestellung zurückzuführen. Durch die hohe Bodenfeuchte im unteren Krumenraum - Roggenstein: 23.1 Gew.%;

Dürnast: 24.1 Gew.% - war die Tragfähigkeit des gepflügten Bodens so gering, daß die höhere Porosität durch die nachfolgende Bestellung zerstört wurde. In dem sandigem Lehm in Roggenstein hatten die gepflügten Parzellen auch im April 1974 gegenüber den Fräsparzellen einen um 4 bzw. 8 Vol% höheren Grobporenanteil. Neben dem Anteil der Grobporen hat auch die Porenkontinuität, die in der Luftpermeabilität zum Ausdruck kommt, eine gewisse Aussagekraft; denn bei gleichem Grobporenanteil aber hoher Porenkontinuität erfolgt ein rascherer Austausch zwischen Bodenluft und Atmosphäre als bei geringer Kontinuität.

Tabelle 23: Luftpermeabilität (pk_a) in 10 - 20 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung im Oktober vor dem Pflügen und im April

		Okt.72	Apr.73	Okt.73	Apr.74	$GD_{5\%}$
RS	Scharpflug	0,8 a	1,2 a	1,0 a	0,9 a	
	Kreiselpflug	0,9 a	1,3 a	0,9 a	0,9 a	
	ohne Pflügen	0,8 a	0,7 b	0,6 b	0,2 b	0,2
DÜ	Scharpflug	0,4	0,5 a	-0,7 a	-1,1 a	
	Kreiselpflug	0,4	0,2 b	-0,4 b	-1,2 a	
	ohne Pflügen	0,4	0,1 b	0,3 c	-0,3 b	0,2

RS: Roggenstein

DÜ: Dürnast

Beim Fräsen wurde auf das Lockern unterer Bodenschichten verzichtet. Die ungestörte Entwicklung des Bodengefüges führte dazu, daß sich das Grobporenniveau in beiden Böden bereits nach einem Jahr auf einen konstanten Wert eingestellt hatte. Demgegenüber konnte bei der Permeabilität im Beobachtungszeitraum eine kontinuierliche Abnahme festge-

stellt werden (Tab. 23, ohne Pflug). In Roggenstein sank der Koeffizient von 0,9 über 0,7, 0,6 bis auf 0,2, in Dürnast von 0,4 über 0,1, 0,3 auf -0,3. In Roggenstein war die Permeabilität in den gepflügten Böden meist höher als die Permeabilität der ungepflügten Böden.

Etwas differenzierter waren die Verhältnisse in Dürnast. Zwar ging auch hier auf den ungepflügten Flächen die Permeabilität zurück, aber die Relation zu den beiden gepflügten Flächen war zu den Untersuchungsterminen sehr verschieden. Bei gleichem Ausgangspunkt im Oktober 1972 konnte durch das Pflügen zur Herbstbestellung die Permeabilität erhöht werden (pk_a: 0,5 und 0,2 gegenüber 0,1). Während der Vegetationsperiode erhöhte sich in dem ungepflügten Boden die Permeabilität geringfügig von 0,1 auf 0,3, in dem gepflügten sank sie bis auf -0,7 bzw. -0,4. Erwartete man, daß durch das Lockern zur Herbstbestellung 1973 die Permeabilität wiederum erhöht würde, so trat das Gegenteil ein. Trotz Pflügens lag im April 1974 die Permeabilität unter dem Niveau von Oktober 1973 und sogar unter dem Niveau der ungepflügten Parzellen.

Der Rückgang der Permeabilität zwischen April und Oktober 1973 läßt sich auf witterungs- und bodenbedingte Setzungsvorgänge zurückführen; die Dichtlagerung nach der Herbstbestellung 1973 kann dagegen nur auf dem ungünstigen Bodenzustand zum Zeitpunkt der Bearbeitung beruhen. Bei einem Wassergehalt bei Feldkapazität - 24,1 Gew.% entsprechen 38,3 Vol.% bei einem pF von 1,6 - war die Schlepperradverdichtung auf gelockertem Boden weitaus stärker als auf ungelockertem Boden, d.h. die Tragfähigkeit der Fräsparzellen war besser als die der Pflugparzellen. Da jedoch auch die Fräsparzellen im April 1973 und 1974 eine geringere Permeabilität als im Oktober zuvor hatten (Tab. 23), stellt sich die Frage, welches Ausmaß die Verdichtung durch das Fräsen hat.

Mit Hilfe der Bodenwiderstandsmessung wurde bereits im zweiten Jahr des Pflugverzichtes die Ausbildung einer Frässohle beobachtet (Abb.7,

S. 44). Im folgendem soll nun die Auswirkung des Fräsens auf die Porengrößenverteilung näher untersucht werden.

Die Stechzylinderproben wurden vor und nach dem Fräsen zur Herbstbestellung und im April aus der Bodenschicht unter der gefrästen Oberfläche genommen. In den Abbildungen 26 und 27 sind die verschiedenen Porenanteile und Permeabilitätskoeffizienten für die beiden Versuchsstandorte Roggenstein und Dürnast dargestellt.

In Roggenstein wurde die Porengrößenverteilung durch das Fräsen geringfügig verändert (Abb. 26). Zu beiden Bearbeitungsterminen wurde der Anteil der weiten Grobporen (> 50 µ) zugunsten der engen Grobporen (10 - 50 µ) vermindert. Dies führte auch zu einem Rückgang der Permeabilität (Okt. 1973). In der Zeit zwischen dem Fräsen und der Probenahme im Frühjahr konnte jedoch diese Verdichtung beseitigt werden. Im April 1973 war der Grobporenanteil sogar höher als im Oktober 1972 vor dem Fräsen.

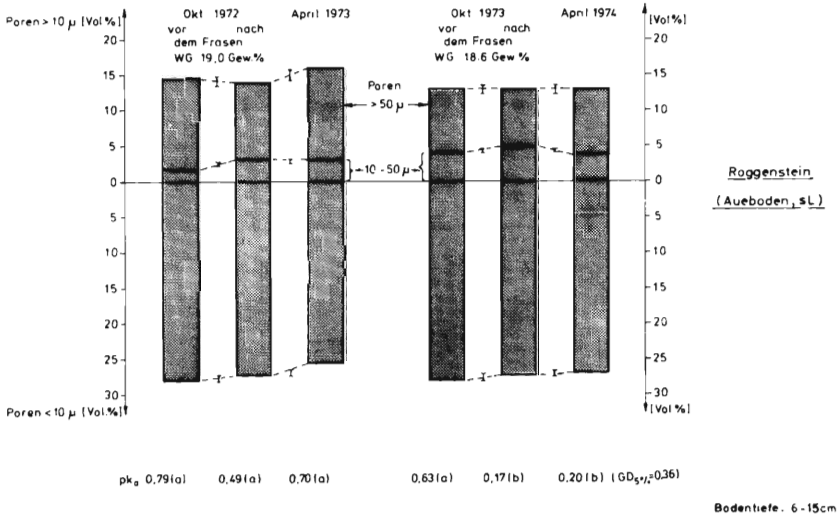

Abb. 26: Einfluß des Fräsens auf das Bodengefüge unter der bearbeiteten Oberfläche (Frässohle), Roggenstein

Auf dem verdichtungsanfälligen Boden von Dürnast war die Verdichtung durch Fräsen bedeutend ausgeprägter (Abb. 27). Der Grobporenteil ging im Oktober 1972 um 3 Vol%, im Oktober 1973 sogar um 5 Vol% zurück. Entsprechend sank der Permeabilitätskoeffizient von 0,38 auf -0,13, bzw. von 0,26 auf -0,33 und lag somit im stauenden Bereich.

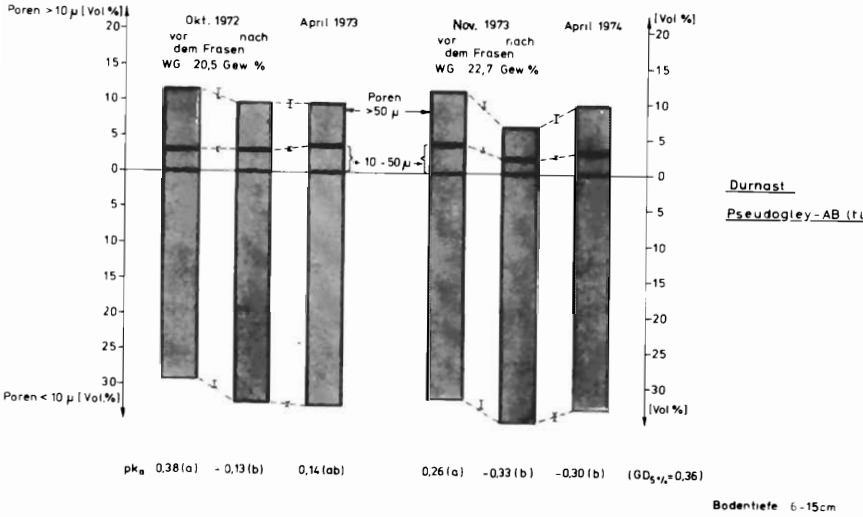

Abb. 27: Einfluß des Fräsens auf das Bodengefüge unter der bearbeiteten Oberfläche (Frässohle), Dürnast

Bis zum April des folgenden Jahres hatte sich das verdichtete Bodengefüge zum größten Teil wiederum aufgelockert. Vor allem nach dem Fräsen im November 1973 war die Auflockerung während der Wintermonate sehr deutlich. Es wurde nahezu der gleiche Grobporenanteil wie vor dem Fräsen gemessen. Lediglich der geringe Permeabilitätskoeffizient von -0,30 weist auf eine Unterbrechung der Porenkontinuität hin.

Beim Verzicht auf das jährliche Pflügen strebten die physikalischen Eigenschaften des mittleren Krumenraumes einem relativ konstanten Wert zu, der durch die Bodenart festgelegt ist. Im sandigen Lehm (Roggenstein) lag z.B. der Grobporenanteil zwischen 12 und 16 Vol%, im tonigen Lehm (Dürnast) zwischen 7 und 12 Vol%. Die Variationsbreite der Luftpermeabilität war dagegen zu weit, als daß man von einem Gleichgeweicht sprechen kann. Auch zeigten die Koeffizienten während des Versuchszeitraums eine kontinuierliche Abnahme. Man muß daher noch einige Vegetationsperioden abwarten, ehe ein Gleichgewicht zwischen Verdichtung und Auflockerung erreicht wird.

Die Dichtlagerung ist auf das Fräsen zurückzuführen; denn durch die Fräsmesser und/oder durch den Druck der Schlepperräder wurde das Bodengefüge in 10 - 20 cm Tiefe komprimiert. Bereits während des Winters lockerte sich aber das verdichtete Bodengefüge auf. Nur noch an der geringen Permeabilität war im Frühjahr die Verdichtung zu erkennen. Im Verlaufe des Sommers kann man jedoch damit rechnen, daß die zunehmende biologische Aktivität eine weitere Lockerung des Bodengefüges und Zunahme der vertikalen Porenkontinuität auslöst (Abb. 27: April-Nov.1973).

Durch das Pflügen wird nicht nur der Boden gelockert, sondern auch die natürliche Entwicklung des Bodengefüges gestört. Es werden vor allem die vertikal verlaufenden Regenwurmgänge, die für eine rasche Wasserabführung nach unten und einen zügigen O_2-Austausch sorgen, unterbrochen (Abb. 28).

Zugleich mit dem Lockern der Krume wird unter der Bearbeitungsgrenze des Pfluges ein Verdichtungshorizont (Pflugsohle) aufgebaut, der die Wurzelausbreitung in den Unterboden hemmt. Da man einerseits bei einem Verzicht auf das Pflügen eine Auflockerung

der Pflugsohle beobachtet hat (EHLERS 1973 (34)), andererseits dem Kreiselpflug eine geringere Pflugsohlenverdichtung nachgesagt wird (FEUERLEIN, 1964 (40), FREUND 1968 (47)), wurden die Auswirkungen des Scharpfluges, Kreiselpfluges und des Pflugverzichtes auf das Bodengefüge der Pflugsohle ebenfalls untersucht.

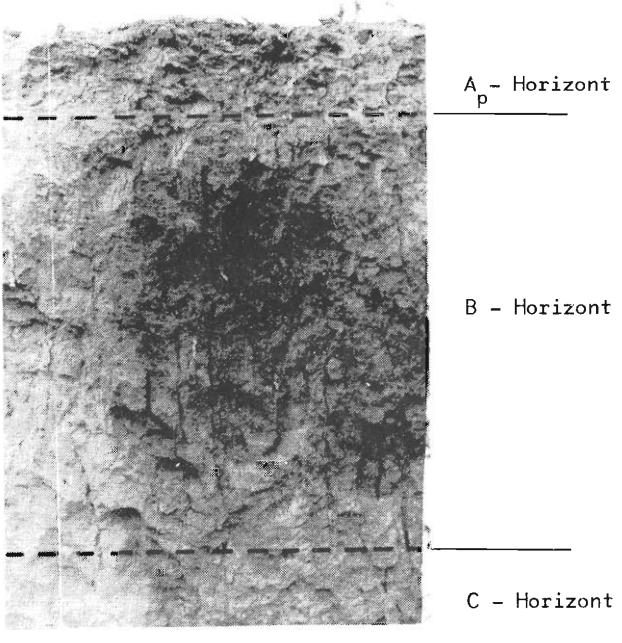

Abb. 28 : Regenwurmgänge im Bodenprofil

4.4.3 Bodengefüge im Unterboden (25 - 30 cm)

In der Regel haben alle Ackerböden unter der Bearbeitungsgrenze einen Verdichtungshorizont (Pflugsohle). Auch in den Versuchsböden war eine Pflugsohle vorhanden, die sich im laufe jahrzehntelanger Ackernutzung gebildet hatte. Bodenwiderstandskurven lassen einen etwa 5 cm dicken Verdichtungshorizont erkennen (Abb. 7 und 8). Aber auch die Porengrößenverteilung im Bodenprofil weist auf eine Dichtlagerung hin (Abb. 29).

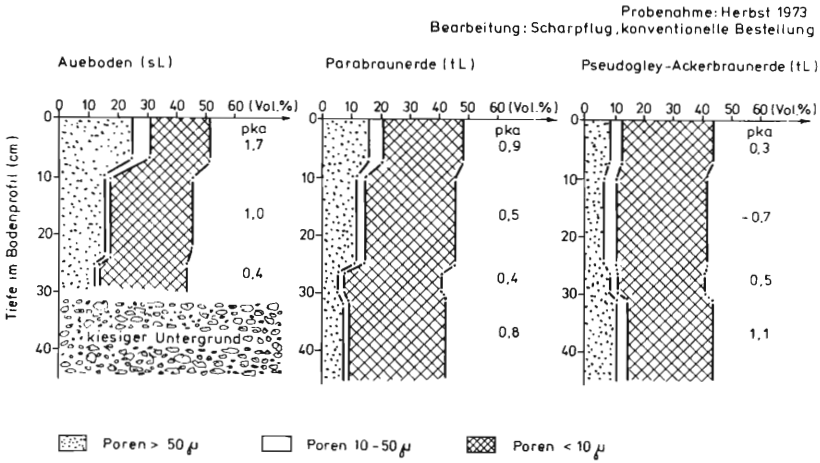

Abb. 29 : Porengrößenverteilung im Bodenprofil der Versuchsböden

In der Krume (0 - 25 cm Tiefe) des Auebodens und der Parabraunerde ging der Grobporenanteil mit zunehmender Tiefe zurück. Zwischen 25 und 30 cm war er am geringsten. Im Unterboden erhöhte er sich wiederum. - Im Aueboden konnten wegen des kiesigen Untergrundes keine Stechzylinderproben genommen werden. - Die Permeabilitätskoeffizienten zeigten die gleiche Abstufung nach der Tiefe

wie der Grobporenanteil. Auffallend ist der hohe Permeabilitäskoeffizient des unbearbeiteten Unterbodens, der am Ende der Vegetationsperiode eine größere Durchlässigkeit hatte als die Krume. In der verdichtungsanfälligen Pseudogley-Ackerbraunerde betrug der Unterschied zwischen Krume und Unterboden nahezu zwei Potenzen (Abb.29).

Die Entstehung der Pflugsohle konnte in den Versuchsböden nicht beobachtet werden. Es konnte jedoch das Ausmaß der Verdichtung durch das Pflügen in einer bereits vorhandenen Pflugsohle untersucht werden. Im folgenden sollen zunächst die Auswirkungen von Schar- und Kreiselpflug auf das Bodengefüge der Pflugsohle miteinander verglichen werden.

1. Auswirkungen des Pflügens auf das Bodengefüge der Pflugsohle

Im Herbst 1972 und 1973 wurden vor und nach dem Pflügen Stechzylinderproben aus der Pflugsohle genommen. Hierzu mußte vor dem Pflügen der Boden bis zur Pflugtiefe aufgegraben werden, nach dem Pflügen konnten die Proben direkt aus der Pflugfurche genommen werden.

In Tabelle 24 sind einige Bodeneigenschaften, die vor und nach dem Pflügen gemessen wurden, angegeben. So verursachte der Scharpflug im Oktober 1972 einen Rückgang der Grobporen von 16,7 auf 10,7 Vol%. Ein Rückgang der Permeabilität deutete sich nur in der Tendenz an. Im Oktober 1973 konnte bei einem geringeren Grobporenniveau vor dem Pflügen (13,8 Vol%) keine Veränderung durch das Pflügen festgestellt werden.

Auch das Pflügen mit dem Kreiselpflug hatte im Oktober 1972 keine Verdichtung verursacht. Demgegenüber wurde im Oktober 1973 das Bodengefüge der Pflugsohle, die vor dem Pflügen einen relativ hohen Grobporenanteil von 16,1 Vol% hatte, verfestigt.

Die Grobporen wurden um 5 Vol% vermindert, die Permeabilität ging von 0,6 auf 0,1 zurück.

Tabelle 24: Auswirkungen von Schar- und Kreiselpflug auf physikalische Bodeneigenschaften eines sandigen Lehms (Roggenstein)

Pflug	Zeitpunkt		WG (Gew.%)	Poren > 10 µ (Vol%)	Poren < 10 µ (Vol%)	pk_a (lg μ^2)
Scharpflug	Okt. 1972	vor	17,3	16,7 a	24,8 a	0,9 a
		nach		10,7 b	30,4 b	0,7 a
	Okt. 1973	vor	21,4	13,8 a	31,0 a	0,4 a
		nach		14,4 a	30,4 a	0,5 a
Kreiselpflug	Okt. 1972	vor	15,7	13,2 a	29,0 a	1,0 a
		nach		11,5 a	30,2 a	1,0 a
	Okt. 1973	vor	19,2	16,1 a	27,4 a	0,6 a
		nach		11,1 b	30,0 a	0,1 b
			$GD_{5\%}$	2,8	3,0	0,5

WG:Wassergehalt vor: vor dem Pflügen
nach:nach dem Pflügen

Zur Erklärung der unterschiedlichen Ergebnisse lassen sich zwei Bodeneigenschaften anführen: der Wassergehalt zum Zeitpunkt des Pflügens und das Grobporenniveau vor der Verfestigung. Ein feuchter Boden läßt sich nämlich leichter verdichten als ein trockener. In dem sandigen Lehm hatte jedoch der

Wassergehalt im Bereich zwischen 15,7 und 21,9 Gew.% keine differenzierende Wirkung. Die Lockerheit des Bodens - gemessen als Grobporenanteil - hatte dagegen einen stärkeren Einfluß als der Wassergehalt. Bei dem relativ hohen Grobporenanteil von 16,7 und 16,1 Vol% verdichteten Schar- und Kreiselpflug in etwa gleichem Ausmaß das Bodengefüge; bei geringem Grobporenniveau von 13,8 und 13,2 Vol% wurde weder durch den Scharpflug, noch durch den Kreiselpflug das Bodengefüge verfestigt.

Tabelle 25: Auswirkungen von Schar- und Kreiselpflug auf physikalische Bodeneiganschaften eines tonigen Lehms (Dürnast)

Pflug	Zeitpunkt		WG (Gew.%)	Poren >10 µ (Vol%)	Poren <10 µ (Vol%)	pk_a (lg μ^2)
Scharpflug	Okt. 1972	vor	16,4	13,9 a	32,9 a	1,1 a
		nach		11,9 a	32,2 a	1,0 a
	Okt. 1972	vor	19,5	10,2 a	29,8 a	0,5 a
		nach		10,7 a	30,8 a	0,7 a
Kreiselpflug	Okt. 1972	vor	16,4	13,9 a	32,9 a	1,1 a
		nach		9,4 b	33,9 a	0,3 b
	Okt. 1973	vor	21,9	10,5 a	32,4 a	0,3 a
		nach		8,9 b	32,8 a	-0,6 b
			$GD_{5\%}$	2,1	2,5	0,4

WG: Wassergehalt vor: vor dem Pflügen
nach: nach dem Pflügen

In Dürnast ergab sich ein anderes Bild (Tab. 25). Nach dem Pflügen mit dem Scharpflug lag der Grobporenanteil bei 11,9 Vol%. Der Rückgang von 13,9 Vol% ließ sich statisch nicht absichern. Auch die Permeabilität war gleich (1,1 und 1,0 lg μ^2), d.h. das Pflügen mit dem Scharpflug verursachte weder im Oktober 1972, noch 1973 eine zusätzliche Verfestigung der Pflugsohle. Im Gegensatz zum Scharpflug verdichtete der Kreiselpflug zu beiden Bearbeitungszeitpunkten das Bodengefüge der Pflugsohle.

Im Oktober 1972 wurden die Poren >10 μ von 13,9 auf 9,4 Vol% vermindert, die Durchlässigkeit von 1,1 auf 0,3(lg μ^2). auch im Oktober 1973 war eine Verminderung der Grobporen von 10,5 auf 8,9 Vol% und ein Rückgang der Durchlässigkeit von 0,3 auf -0,6 gegeben.

Da sich die unterschiedliche Verdichtung durch Schar- und Kreiselpflug an Hand des Bodenzustandes vor dem Pflügen nicht erklären läßt, ist die zusätzliche Verfestigung der Pflugsohle durch den Kreiselpflug auf dessen Arbeitsweise zurückzuführen. Das Pflugschar hebt einen Teil des Erdbalkens an und führt ihn an den Kreiselkörper heran. Zugleich schneidet das rotierende Tellerschar am unteren Ende des Kreiselkörpers den restlichen Teil des Erdbalkens ab. Bei diesem Arbeitsvorgang verdichtete das rotierende Tellerschar bei den gegebenen Verhältnissen das Bodengefüge stärker als das starre Schar des Normalpfluges.

Die Auswirkungen von Schar- und Kreiselpflug auf das Bodengefüge einer bereits vorhandenen Pflugsohle waren in den beiden Versuchsböden unterschiedlich. Während in dem sandigen Lehm von Roggenstein das Pflügen mit dem Schar- und Kreiselpflug das gleiche Ausmaß der Verdichtung hatte, wurde in dem tonigen Lehm von Dürnast die Pflugsohle durch das Pflügen mit dem Kreiselpflug

stärker verdichtet als mit dem Scharpflug.

Wenn ein Rückgang der Grobporen in einer vorhandenen Pflugsohle um 2 - 3 Vol% eine Ertragseinbuße brächte, dürfte auf mittelschweren, verdichtungsanfälligen Böden der Kreiselpflug nicht eingesetzt werden. Es ist aber noch nicht geklärt, inwieweit eine zusätzliche Verdichtung eines vorhandenen Verdichtungshorizontes, der das Wurzelwachstum bereits hemmt, eine weitere Ertragsminderung auslösen kann.

Der Einsatz des Kreiselpfluges wäre weniger bedenklich, wenn sich das Bodengefüge der Pflugsohle ähnlich wie in der Frässohle wieder auflockern würde. HANUS, 1968 (55) hat in unterschiedlich verdichteten Pflugsohlen im Jahr darauf keinen Unterschied mehr feststellen können, d.h. je mehr eine Pflugsohle durch das Pflügen verfestigt wurde, desto stärker war der Lockerungsvorgang im nachfolgenden Jahr. Um die Entwicklung des Bodengefüges zu verfolgen, wurden daher im Frühjahr die Auswirkungen der drei Grundbodenbearbeitungsvarianten (Schar- und Kreiselpflug, ohne Pflügen) nochmals untersucht.

2. Entwicklung der Pflugsohle nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung

Die Pflugsohle der jährlich gepflügten Parzellen konnte sich nur während einer Vegetationsperiode ungestört regenerieren, die Pflugsohle der Fräsparzellen, die in Roggenstein im Oktober 1970 und in Dürnast im Oktober 1971 zum letzten Mal gepflügt worden waren, konnten sich über einen längeren Zeitraum ungestört entwickeln. Sieht man von einer tiefer reichenden Schlepperradverdichtung ab, dann stand das Bodengefüge unterer Bodenschichten nur unter biologischen und klimatischen Einflüssen. Die Abbildungen 30 und 31 zeigen, wie sich die Porenan-

teile nach den verschiedenen Verfahren der Grundbodenbearbeitung entwickelt haben. Unter zwei Gesichtspunkten muß man die Porengrößenverteilung betrachten:

1. Lockert sich das Bodengefüge nach dem Pflügen wieder auf?
2. Wie verläuft die Entwicklung der Pflugsohle bei einem Pflugverzicht ?

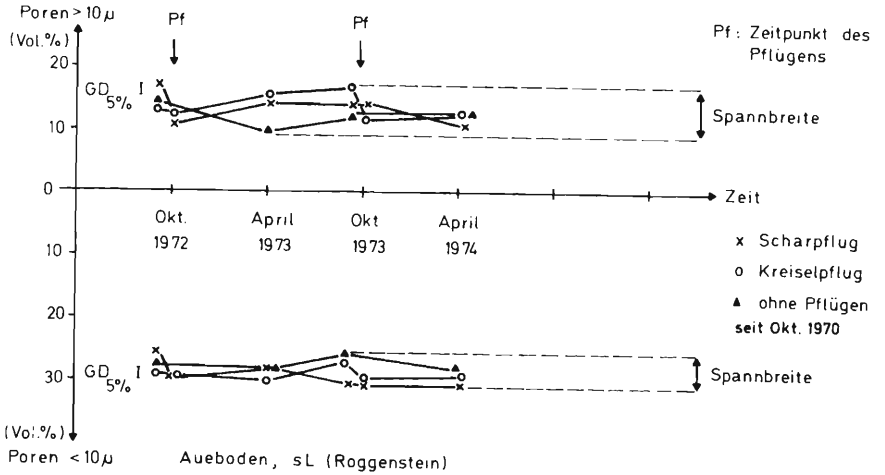

Abb. 30 : Porengrößenverteilung in der Pflugsohle nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung (Roggenstein).

Im sandigen Lehm reichte die Spannbreite der Grobporen von 9 bis 16 Vol%. Eine Zunahme der Grobporen nach dem Pflügen im Oktober 1972 konnte bis April 1973 und Oktober 1973 beobachtet werden. Nach dem Pflügen im Oktober 1973 war bis April 1974 dagegen keine Zunahme festzustellen. Im April 1974

war der Grobporenanteil der drei Varianten mit 10 - 12 Vol% sogar gleich hoch. Der Pflugverzicht brachte in den 3 1/2 Jahren nach dem letzten Pflugeinsatz keine Zunahme des Grobporenanteils.

Die Spannbreite der kapillaren Poren erstreckte sich von 26 bis 31 Vol%. Zu den einzelnen Untersuchungsterminen waren die Unterschiede zwischen den drei Varianten meist geringer als die Grenzdifferenz oder lagen nur knapp über diesem Wert, so daß keine eindeutige Tendenz abzulesen ist. Auch der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Probenahme war meist gleich oder nur wenig verschieden (Tab. 26). Im Frühjahr war er im Durchschnitt um 1 bis 3 Vol% niedriger als im Herbst.

Tabelle 26: Wassergehalt und Permeabilität in der Pflugsohle nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung (Roggenstein)

		Okt. 1972*	Apr. 1973	Okt. 1973*	Apr. 1974	GD5%
Wassergehalt (Vol%)	Scharpflug	31,8 a	27,6 a	31,2 b	30,2 b	
	Kreiselpflug	29,9 a	29,1 a	29,9 ab	28,3 ab	2,0
	ohne Pflügen	29,7 a	28,5 a	28,2 a	27,0 a	
Permeabilität pk_a (lg μ^2)	Scharpflug	0,7 ab	0,8 a	0,5 a	- 0,2 a	
	Kreiselpflug	1,0 a	0,6 a	0,1 a	- 0,1 a	0,4
	ohne Pflügen	0,5 b	0,7 a	0,9 b	0,9 b	

* nach dem Pflügen

Die Permeabilität hatte eine interessante Entwicklung (Tab. 26). Der Koeffizient stieg von zunächst 0,5 auf 0,7 und 0,9 . Im Oktober 1973 und April 1974 war er bedeutend größer als in den jährlich gepflügten Parzellen, d.h., während der Grobporenanteil konstant blieb, hat sich die senkrechte Porenkontinuität schrittweise erhöht.

Im tonigen Lehm (Dürnast läßt die Porengrößenverteilung in der Pflugsohle keine eindeutige Differenzierung zwischen den drei Verfahren der Grundbodenbearbeitung erkennen (Abb. 31). Das Grobporenniveau lag zwischen 5 und 14 Vol%, das Niveau der kapillaren Poren lag zwischen 27 und 36 Vol%. Bei der Gegenüberstellung der einzelnen Verfahren fällt auf, daß sich die Grobporenanteile der drei Varianten mit Ausnahme des Aprils 1973 nicht unterschieden. Die Anteile der kapillaren Poren zeigten im April und Oktober 1973 ebenfalls größere Unterschiede, die sich jedoch kaum auf die unterschiedlichen Verfahren der Grundbodenbearbeitung zurückführen lassen.

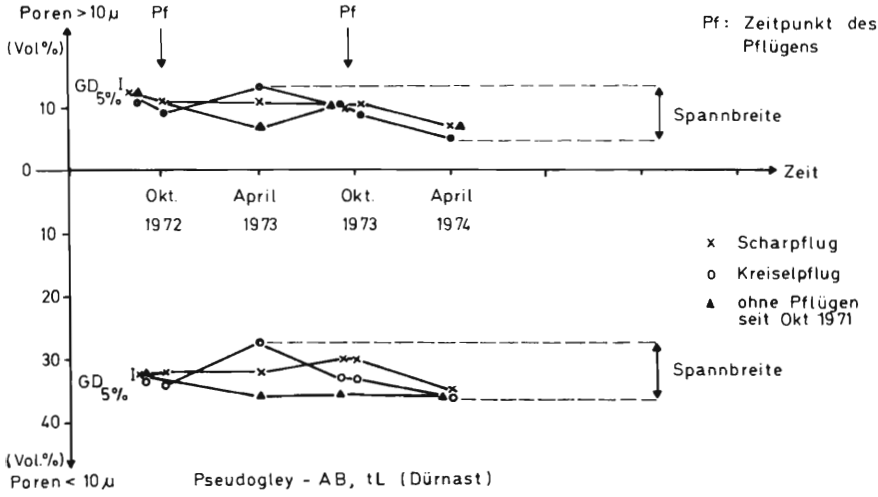

Abb. 31 : Porengrößenverteilung in der Pflugsohle nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung (Dürnast)

Der Permeabilitätskoeffizient in den ungepflügten Parzellen unterlag den gleichen Schwankungen wie der Grobporenanteil (Tab. 27). Im Herbst war er höher als im Frühjahr (1,1 gegenüber -0,3 und 0,7 gegenüber -0,1). Im Gegensatz zum sandigen Lehm von Roggenstein konnte man im tonigen Lehm keine Zunahme der senkrechten Porenkontinuität beobachten.

Tabelle 27: Wassergehalt und Permeabilität in der Pflugsohle nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung (Dürnast)

		Okt. 1972*	Apr. 1973	Okt. 1973*	Apr. 1974	GD5%
Wassergehalt (Vol%)	Scharpflug	24,6 a	31,4 b	30,7 a	36,7 a	
	Kreiselpflug	25,3 a	26,8 a	33,6 b	36,0 a	1,6
	ohne Pflügen	25,5 a	34,0 c	30,9 a	35,4 a	
Permeabilität ($\lg \mu^2$)	Scharpflug	1,0 a	0,0 ab	0,7 a	- 0,3 a	
	Kreiselpflug	0,3 b	0,3 b	-0,6 b	- 0,1 a	0,5
	ohne Pflügen	1,1 a	-0,3 a	0,7 a	- 0,1 a	

* nach dem Pflügen

Unabhängig von dem Verfahren der Grundbodenbearbeitung war bei hohem Grobporenanteil der Anteil der kapillaren Poren geringer. Der Korrelationskoeffizient war hoch signifikant (r=-0.73) und hatte ein negatives Vorzeichen, das die gegenläufige Beziehung zum Ausdruck brachte. Sucht man nach der Ursache für diesen Zusammenhang, dann stößt man auf den Wassergehalt (Tab. 27). Je höher der Wassergehalt war, desto geringer war der Grobporenanteil (r=-0.82) und desto höher war der Anteil der kapillaren Poren (r = 0,53). Da der Korrelationskoeffizient keine kausalen Zusammenhänge nachweist, bleibt die Frage zu klären, ob der Wassergehalt des Bodens die Porengrößenverteilung beeinflußt oder die Porengrößenverteilung den Wassergehalt.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte auf diese Frage nur kurz eingegangen werden. So wurde im Frühjahr, nachdem während des Winters die Hohlräume des Bodens mit Wasser angefüllt werden, bei stets höherem Wassergehalt eine dichtere Struktur gemessen. Setzt man voraus, daß überall eine gleichmäßige Textur vorliegt, dann dürfte der mit steigendem Wassergehalt erhöhte Quellungsdruck das auslösende Moment für die Kompression der Grobporen und Vermehrung der kapillaren Poren sein. Daraus folgt, daß in einem tonhaltigen Boden ein unterschiedlicher Wassergehalt Auswirkungen von Bearbeitungsmaßnahmen überdecken kann.

Die Ursache für die Tatsache, daß im April 1973 die ungepflügte Parzelle einen gegenüber den anderen Parzellen höheren Wassergehalt hatte, im Oktober 1973 aber die Kreiselpflugparzelle, läßt sich durch Bearbeitungsmaßnahmen nicht erklären. Es ist zu vermuten, daß das etwas hängige Versuchsfeld eine unterschiedliche Wasserführung im Untergrund hat.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich die physikalischen Eigenschaften des Verdichtungshorizontes, der in Jahrzehnten durch das Pflügen erzeugt worden war, in bestimmten Grenzen verändern. Man kann aber weder eine zusätzliche Verdichtung, die länger als ein halbes Jahr erhalten bleibt, noch eine Auflockerung in den ersten drei Jahren beobachten. Erst im vierten Jahr erhöhte sich im sandigen Lehm (Roggenstein) unabhängig vom Grobporenanteil die Durchlässigkeit. Daraus folgt, daß durch das jährliche Pflügen eine bereits vorhandene Pflugsohle nicht stärker verdichtet werden kann. Unterschiede, die zwischen dem Schar- und Kreiselpflug auftraten, haben keinen anhaltenden Einfluß auf die physikalischen Eigenschaften der Pflugsohle. Eine wirksame Auflockerung durch die biologische Aktivität ist kurzfristig nicht zu erwarten.

5. Diskussion der Ergebnisse

Die Geräte der Bodenbearbeitung kann man nach zwei Gesichtspunkten betrachten. Steht das Geräte mit seiner Technik und seinem Bearbeitungseffekt im Mittelpunkt, muß man den Effekt mit bodenmechanischen Kriterien beurteilen. Sollen die Auswirkungen auf den Boden Hauptziel der Untersuchungen sein, muß man bodenphysikalische Kriterien auswählen. In dieser Arbeit wurde die Bodenmechanik nur soweit berücksichtigt, als daß der Zerkleinerungseffekt der Geräte gemessen wurde, um das durch die Bearbeitung erzeugte Aggregatgemisch, das die Grundlage für den Aufbau des Bodengefüges darstellt, zu erfassen.

Der Bearbeitungseffekt und die physikalischen Bodeneigenschaften stehen in einer engen Wechselwirkung. Der Effekt hängt vom Bodenzustand zum Bearbeitungszeitpunkt ab; zugleich aber wird durch diesen Bearbeitungseffekt die physikalische Struktur des Bodens neu aufgebaut. Bodenart und Bodentyp haben zwar den größten Einfluß auf die Bodenphysik, aber durch die Bodenbearbeitung lassen sich die physikalischen Bodeneigenschaften in den von der Textur festgelegten Grenzen den jeweiligen Anforderungen der Kulturpflanzen anpassen.

Die Verfahren der Minimalbestelltechnik müssen daher unter dem Blickpunkt der Bearbeitbarkeit des Bodens, des Zerkleinerungseffektes der Geräte und der Rückwirkungen auf das Bodengefüge betrachtet werden.

1. Die Bearbeitbarkeit des Bodens

Die Zerkleinerung des Bodens zu einem bestimmten Aggregatgemisch, das in der Feinheit oder Rauheit des Saatbettes zum Ausdruck

kommt, ist die wichtigste Aufgabe der Bodenbearbeitung, die sich der unterschiedlichen Bearbeitbarkeit eines Bodens durch Variation der Zerkleinerungsintensität anpassen muß.

Unter der Bearbeitbarkeit versteht man den Bodenzustand, der eine zufriedenstellende Bearbeitung zuläßt. Für die Saatbettbereitung bedeutet es, daß die Krume tragfähig und zugleich krümelfähig sein sollte. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt der Bearbeitbarkeit auf der Krümelung des Bodens.

Nach ATTERBERG, 1912 (5), 1914 (6) wird die beste Zerkleinerung tonhaltiger Böden dann erreicht, wenn der Wassergehalt unterhalb der sogenannten Ausrollgrenze liegt. Auch BAVER 1956 (13) und WOLKEWITZ, 1964 (115) weisen dieser Grenze besondere Bedeutung zu. Beim Unterschreiten dieser Grenze wird die Festigkeit des Bodens (Kohäsion) so groß, daß er nur noch schwer zerkleinert werden kann, beim Überschreiten nimmt das Kraftvermögen (Adhäsion) der Bodenaggregate derart zu, daß sie verkleben.

Nach WOLKEWITZ, 1964 (115) liegt die Ausrollgrenze bei einem pF-Wert, der vom Tongehalt des Bodens bestimmt wird. Mit steigendem Tongehalt erhöht sich der pF-Wert, d.h. bei einem tonreichen Boden müssen Poren mit einem geringeren Durchmesser entwässert werden als in einem tonarmen Boden. In Böden mit 20 % Ton liegt die Ausrollgrenze bei dem Wassergehalt von pF 2.4, d.h. die Grobporen sind wasserfrei, die Mittel- und Feinporen mit Wasser gefüllt. Nimmt man an, daß die optimale Bearbeitbarkeit der Versuchsböden bei einem pF-Wert von 2.4 liegt, dann erhält man folgende Wassergehalte:

Aueboden	:	20 Vol% (= 16 Gew.%)
Parabraunerde	:	30 Vol% (= 20 Gew.%)
Pseudogley - Ackerbraunerde	:	30 Vol% (= 20 Gew.%)

Zur Herbstbestellung der beiden Versuchsjahre lag der Wassergehalt meist oberhalb des Wertes, der für eine Bearbeitung optimal wäre. Im Aueboden (Roggenstein) war der Zerkleinerungseffekt zu den beiden Herbstbestellungen bei einem Wassergehalt von 18,7 und 17,3 Gew.% in etwa gleich. In der Pseudogley-Ackerbraunerde (Dürnast) war dagegen bei einem Wassergehalt von 22,1 Gew% die Zerkleinerung der Aggregate geringer als bei einem Wassergehalt von 19,6 Gew.%. Bei geringeren Bodenfeuchten zum Bearbeitungszeitpunkt wäre eine feinere Zerkleinerung möglich gewesen. Mit diesen Ergebnissen soll die in den Versuchen aktuelle Bearbeitbarkeit der Böden der potentiellen Bearbeitbarkeit gegenübergestellt werden, um den Effekt der Geräte besser abschätzen zu können. Der Einfluß des Wassergehaltes auf die Zerkleinerung selbst konnte nur an einem Modellversuch mit der Fräse dargestellt werden, der außerhalb der Standardversuche durchgeführt wurde.

Die Beziehung zwischen dem Wassergehalt eines Bodens und dem Zerkleinerungseffekt einer Fräse hatte einen parabolischen Verlauf mit einem Maximum zwischen 14 und 16 Gew.%. Unterhalb oder oberhalb dieser Bodenfeuchte ging der Zerkleinerungseffekt zurück. Der Wassergehalt von 14 bis 16 Gew.% entspricht bei der gegebenen Lagerungsdichte von 1,51 (g/cm^3) dem Wassergehalt, der bei pF 2,0 bis 2,6 liegt. Dieser Wert stimmt mit dem von WOLKEWITZ (115) angegebenen pF-Wert von 2,18 für Böden mit 10 % Ton überein.

Mit größer werdendem Abstand von dem Bereich der optimalen Bearbeitbarkeit werden wahrscheinlich die beiden Äste der Parabel, die die Beziehung zwischen Bodenfeuchte und Zerkleinerung in dem Versuchsboden charakterisierte, abflachen, so daß eine sogenannte Glockenkurve entsteht, die dem natürlichen Verlauf besser ent-

spricht. Wenn man eine derartige Beziehung für alle tonhaltigen Böden annimmt, dann läßt sich der Widerspruch zwischen dem Ergebnis von MANGELSDORFF, 1928 (74), der mit abnehmendem Wassergehalt im Boden eine geringere Zerkleinerung durch die Geräte feststellte, und dem Ergebnis dieser Versuche, die bei zunehmendem Wassergehalt eine geringere Zerkleinerung hatten, erklären. Der Wassergehalt, bei dem MANGELSDORFF (74) den Boden bearbeitete, lag unterhalb der optimalen Bodenfeuchte, während die Bodenfeuchten dieser Versuche oberhalb des Optimums lagen. Wenn man einen Bodenbearbeitungsversuch beschreibt, sollte man daher neben dem Wassergehalt zum Zeitpunkt der Bearbeitung auch den Feuchtebereich der maximalen Zerkleinerung angeben, der sich in angenäherter Form nach den Angaben von WOLKEWITZ, 1964 (115) bestimmen ließe. Eine größere Information als der Wassergehalt allein würde auch die Wasserspannung zum Zeitpunkt der Bearbeitung (pF-Wert) bieten.

2. Der Zerkleinerungseffekt der Minimalbestellgeräte

Ziel der Versuche war es, mit den Minimalbestellgeräten in einem Arbeitsgang das gleiche Saatbett zu bereiten wie mit einer konventionellen Gerätekombination in mehreren Arbeitsgängen. Hierzu wurde die Zerkleinerungsintensität der Minimalbestellgeräte so abgestimmt, daß der visuelle Unterschied zu der konventionell bestellten Fläche möglichst gering blieb. Nach der Bearbeitung wurde dann die Aggregatgrößenverteilung des Saatbettes bestimmt.

Als Maßzahl der Aggregatgrößenverteilung kann unter anderem die innere Oberfläche nach Rosin-Rammler-Bennett (KIESSKALT, MATZ 1951 (116)) oder der Gewogene Mittlere Durchmesser nach VAN BAVEL, 1950 (14)) herangezogen werden. Für die Probleme dieser Arbeit wurde der Gewogene Mittlere Durchmesser (GMD) gewählt, da er ohne größe-

ren Aufwand berechnet werden kann und bei bodenphysikalischen Untersuchungen häufig Verwendung findet (DE BOODT et al.,1961 (31), HARTGE, 1972 (56), SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL, 1970 (99)). Der Nachteil des GMD liegt darin, daß bei der Beurteilung der Geräte ein hoher GMD einem geringen Zerkleinerungseffekt entspricht. Zur leichteren Interpretation wurde daher aus dem GMD der reziproke Wert gebildet, der in dieser Arbeit als Zerkleinerungsgrad diskutiert wurde.

Der durch die Bestellgeräte erzeugte Zerkleinerungsgrad lag zwischen 4 und 11 Einheiten. Das entspricht einem GMD von etwa 10 bis 25 mm. Berechnet man den Zerkleinerungsgrad der Aggregatgemische, die RID, 1964 (95) mit konventionellen Gerätekombinationen erzielt hat, erhält man einen Bereich zwischen 3,5 und 5,0 Einheiten. In diesen Versuchen wurde der Boden mit konventionellen Geräten nur bei schlechter Bearbeitbarkeit so wenig zerkleinert. Bei günstiger Bearbeitbarkeit lag der Zerkleinerungsgrad je nach Bodenart zwischen 6,5 und 11,0 Einheiten, d.h. daß unter den gegebenen Verhältnissen trotz nicht optimaler Wassergehalte zum Bearbeitungszeitpunkt der Boden relativ gut zerkleinert wurde.

Mit der Kreiselegge gelang es sehr häufig, das gleiche Aggregatgemisch zu erzeugen wie mit der konventionellen Gerätekombination. Die Rüttelegge hatte demgegenüber immer ein feineres Saatbett hinterlassen, die Fräse und der Feingrubber ein rauheres. Auch wenn es den Anschein erweckt, daß bei gegebener Zielsetzung die Geräteeffekte zufällig diese Reihenfolge einnahmen, so wiederholte sich doch zu allen Bearbeitungsterminen diese Abstufung. Einschränkend muß aber hinzugefügt werden, daß an der Fräse gewollt eine geringere Zerkleinerungsintensität eingestellt worden war, um die oft beobachteten Verschlämmungserscheinungen zu fein gefräster Böden einzudämmen. Es wä-

re durch eine Verkürzung der Bissenlänge jederzeit möglich gewesen, ein feineres Saatbett herzustellen. Mit dem Feingrubber, dessen Zerkleinerungsintensität allein durch die Fahrgeschwindigkeit variiert werden kann, war eine feinere Zerkleinerung der Bodenaggregate nicht möglich, da die Fahrgeschwindigkeit bei feuchtem Bodenzustand durch den zunehmenden Schlupf begrenzt wurde. Der Einsatz des Feingrubbers ist daher nur bei guter Bearbeitbarkeit, wie z.B. im Frühjahr oder auf leichten Böden, zu empfehlen.

Die Zerkleinerungsintensität wurde mit allen Geräten nur durch die Fahrgeschwindigkeit geändert, die Umfangsgeschwindigkeit der Werkzeuge wurde konstant gehalten. Nachdem die Reihung der Geräteeffekte bei verschiedener Bearbeitbarkeit in etwa gleich war, hat die Variation der Fahrgeschwindigkeit in dem Bereich zwischen 0,9 und 1,6 m/s nur einen geringen Einfluß auf den Zerkleinerungseffekt; einen stärkeren Einfluß haben die Bearbeitbarkeit und der Bewegungsablauf der Werkzeuge. Auffallend war die gleichmäßig feine Zerkleinerung durch die Rüttelegge. Selbst bei der hohen Bodenfeuchte in Dürnast (Nov. 1973) konnte die Rüttelegge ein Aggregatgemisch mit einem Zerkleinerungsgrad von 6,9 Einheiten erzeugen. KOHLER, 1960 (69), der den Effekt der Motoregge, die ein Vorläufer der heutigen Rüttelegge war, untersuchte, hat ein etwas gröberes Aggregatgemisch gemessen. Im Gegensatz zur Rüttelegge reagierte die Kreiselegge empfindlicher auf die Bearbeitbarkeit des Bodens. bei hoher Bodenfeuchte lag der Zerkleinerungsgrad bei 4,4 Einheiten und war nur wenig kleiner als der des Feingrubbers, bei geringerer Bodenfeuchte hatte die Kreiselegge den Boden ebenso fein wie die Rüttelegge zerkleinert.

Nachdem mit den Minimalbestellgeräten - ausgenommen der Feingrubber - das gleiche Aggregatgemisch erzeugt werden kann wie

mit der konventionellen Gerätekombination und auch zum Teil in diesen Versuchen erzeugt wurde, stellt sich die Frage, ob das erzeugte Aggregatgemisch mit einem Zerkleinerungsgrad zwischen 6,5 und 11,0 Einheiten auch die besten Voraussetzungen für die Pflanzenentwicklung anbietet. Um der Antwort etwas näher zu kommen, wurden die physikalischen Bodeneigenschaften untersucht. Dabei kristallisierte sich ein Zusammenhang zwischen der Aggregatgrößenverteilung und dem Grobporenanteil heraus. Je feiner das Aggregatgemisch in dem angegebenen Bereich war, desto höher war der Grobporenanteil. Zwar konnte dieses Ergebnis nur für den sandigen Lehm (Roggenstein) statistisch abgesichert werden, aber in der Tendenz wurde diese Beziehung auch für den tonigen Lehm (Dürnast) bestätigt. Der mit zunehmender Zerkleinerung verbundene Anstieg des Grobporenanteils ist begrenzt; denn nach DOJARENKO, 1926 (33) vermindern die Bodenteilchen < 0,25 mm die Zunahme der Grobporen. Die Fraktion < 0,25 mm wurde jedoch in dieser Arbeit nicht abgesiebt. Da man aber annehmen kann, daß mit zunehmendem Anteil der Aggregatfraktion < 2 mm auch die Teilchen < 0,25 mm zunehmen, dürfte bei der Frühjahrsbestellung in Frankendorf der hohe Anteil der Aggregate < 2 mm die Ursache für die nicht abgesicherte Beziehung zwischen Aggregatgrößenverteilung und Porengrößenverteilung sein. Eine signifikante Beziehung ließe sich wahrscheinlich mit den Fraktionen < 1 mm und < 0,25 mm herstellen. Zur Erfassung der Geräteunterschiede schien dieser zusätzliche Meßaufwand jedoch überflüssig.

Nach KUIPERS, 1961 (70) beeinflußte der Mittlere Durchmesser eines Aggregatgemisches im Bereich zwischen 2 und 10 mm die Porengrößenverteilung nur geringfügig; unterhalb eines Durchmessers von 2 mm stieg der Anteil kapillarer Poren mit abnehmendem Durchmesser exponentiell an, d.h. die Grobporen wurden im gleichen Ausmaß vermindert. Deshalb sollte durch die Bodenbearbeitung

der Anteil der Aggregate <1 mm nicht erzeugt werden. Nach BOEKEL, 1963 (19) sollte ein schwerer Boden stärker gekrümelt werden als ein leichter Boden; mittelschwere Böden sollten nach der Bearbeitung ein Aggregatgemisch mit einem Mittleren Durchmesser zwischen 5 und 10 mm haben. Ein derart feines Saatbett konnt man nur zur Frühjahrsbestellung in Frankendorf erzeugen, in Roggenstein lag der Gewogene Mittlere Durchmesser zwischen 10 und 27 mm, in Dürnast zwischen 15 und 31 mm. In diesem GMD-Bereich konnte im Gegensatz zu dem vom KUIPERS (70) untersuchten Bereich mit abnehmendem Durchmesser eine Zunahme der Grobporen festgestellt werden. Der Widerspruch der Ergebnisse deutet darauf hin, daß die Beziehung zwischen Aggrega durchmesser und Grobporenanteil in zwei Bereiche zu unterteilen ist. Mit zunehmender Zerkleinerung ist bis zu einem bestimmten Durchmesser eine Vermehrung der Grobporen verbunden. Wird der Boden noch feiner zerkleinert, dann sinkt der Grobporenanteil zunächst geringfügig, bei einer weiteren Zerkleinerung aber exponentiell. Das zu erzielende Grobporenmaximum dürfte bei einem Gewogenen Mittleren Durchmesser zwischen 5 und10 mm liegen.

In diesen Versuchen hätte man eventuell mit einer Steigerung der Zerkleinerungsintensität den Grobporenanteil erhöhen können. Eine Erhöhung des Grobporenanteils war jedoch nicht erforderlich, da die Grobporen den Schwellenwert, der für eine ausreichende Durchlüftung nach BAVER, 1949 (12) und BOEKEL, 1963 (19) zwischen 10 und 15 Vol% liegen sollte, nicht unterschritten. Die Auswirkungen auf das Bodengefüge ließen zwar gewisse Abstufungen zwischen den Geräten erkennen, aber das durch die Minimalbestellgeräte oder durch die konventionelle Gerätekombination geschaffene Saatbett hatte zu keinem Untersuchungszeitpunkt für das Pflanzenwachstum ungünstige physikalische Bodeneigenschaf-

ten. Die Minimalbestellgeräte haben gegenüber dem konventionellen Verfahren zumindest kein ungünstigeres Bodengefüge erzeugt. In diesem Zusammenhang muß man jedoch darauf hinweisen, daß ZELTNER, 1975 (120) mit zunehmendem Aggregatdurchmesser einen abnehmenden Aufgang der Pflanzen festgestellt hat. Sollte man nun unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf das Bodengefüge und den Aufgang ein bestimmtes Aggregatgemisch empfehlen, dann müßte unter den gegebenen Versuchsbedingungen dieses Aggregatgemisch einen Gewogenen Mittleren Durchmesser von 8 - 10 mm haben. Der Wert entspricht einem Zerkleinerungsgrad von ca. 10 bis 12 Einheiten.

3. Der spezifische Zerkleinerungsaufwand

Da die Vorzüglichkeit eines Bodenbearbeitungsgerätes nicht allein durch die Bearbeitungsqualität, sondern auch durch den für die Schaffung dieser Qualität notwendigen Leistungsaufwand bestimmt wird, wurde eine Maßzahl gebildet, in die Arbeitseffekt und Leistungsaufwand eingingen. Die Maßzahl ist der Quotient aus Leistungsaufwand, bezogen auf das bearbeitete Bodenvolumen und Zerkleinerungsgrad. Er wird als spezifischer Zerkleinerungsaufwand bezeichnet. Voraussetzung für die Berechnung dieses Verhältnisses ist die Linearität der Beziehung zwischen den drei Einflußgrößen. Für die Fräse konnte diese Linearität der Beziehung nachgewiesen werden, so daß man für die anderen Geräte ebenfalls eine lineare Abhängigkeit der drei Einflußgrößen annehmen kann. Errechnet man unter dieser Annahme den spezifischen Zerkleinerungsaufwand, dann erhält man eine starke Differenzierung zwischen den Geräten. So mußte für die Kreiselegge gegenüber dem Feingrubber und der Rüttelegge das Drei- und Vierfache an Leistung aufgebracht werden, um eine Zerkleinerungseinheit zu erzeugen, für

die Fräse in etwa das Zweifache.Die Ursache dieser Unterschiede ist im Bewegungsablauf der Werkzeuge zu suchen; denn die Fahrgeschwindigkeit und der Zerkleinerungsgrad, die als einzige Größen variiert worden waren, hatten in dem Versuchsbereich einen geringeren Einfluß auf den spezifischen Zerkleinerungsaufwand als der gerätebedingte Leistungsbedarf.

Die Zinken des Feingrubbers werden geradlinig durch den Boden gezogen. Sie haben die Geschwindigkeit der Vorfahrt. Bei der Rüttelegge wird die geradlinige Bewegung von einer Querbewegung überlagert,bei der Kreiselegge von einer Kreiselbewegung. Die Zinken der Rüttelegge wurden mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1,08 m/s hin- und herbewegt, die Zinken der Kreiselegge hatten eine Umfangsgeschwindigkeit von 3,27 m/s. Da der Strömungswiderstand mit der Geschwindigkeit quadratisch ansteigt, dürfte die hohe Umfangsgeschwindigkeit der Kreiselzinken der Hauptgrund für den hohen Leistungsaufwand der Kreiselegge sein. Es wäre zu untersuchen, welchen Einfluß eine langsamere Umfangsgeschwindigkeit auf den Leistungsaufwand und Zerkleinerungseffekt hat und ob man eine verminderte Zerkleinerungsintensität durch die Erhöhung der Zinkenzahl/m Arbeitsbreite ausgleichen sollte. Der relativ geringe spezifische Zerkleinerungsaufwand der Rüttelegge kann mit größter Wahrscheinlichkeit auf die langsamere Zinkenbewegung bei gleichzeitig höherer Zinkenzahl/m Arbeitsbreite von 12 gegenüber 8 bei der Kreiselegge zurückgeführt werden.

Die Umfangsgeschwindigkeit der Fräsmesser war 5,1 m/s. Trotz der höheren Umfangsgeschwindigkeit lag der spezifische Zerkleinerungsaufwand der Fräse unter dem der Kreiselegge. Dieses Ergebnis beruht wohl darauf, daß die Fräsmesser nicht ständig wie die Zinken der Eggen im Boden bewegt werden, sondern bei der vertikal zur Oberfläche rotierenden Bewegung je nach Bissen-

länge und Arbeitstiefe nur für einen Teil der Umlaufbahn in den Boden eintauchen. Dabei schneiden die Fräsmesser Brocken aus dem Bodenverband heraus und werfen sie an die Prallhaube, an der die Bodenbrocken in kleinere Aggregate zerbrechen. Dieser Zerkleinerungsablauf ermöglicht es, die Fräse auch auf ungepflügtem Boden einzusetzen.

4. Entwicklung des Bodengefüges nach unterschiedlicher Grundbodenbearbeitung

Zu den wichtigsten Aufgaben der Grundbodenbearbeitung zählt das Vergraben von Unkraut und die Lockerung des Bodengefüges. Der Scharpflug hat diese Anforderungen in der Vergangenheit bestens erfüllt. Da aber der Zeitaufwand für das Pflügen sehr hoch ist, fehlte es nicht an Bestrebungen, das Pflügen durch andere Bearbeitungsmaßnahmen zu ersetzen. Nachdem es heute möglich ist, einerseits mit chemischen Mitteln das Unkraut zu beseitigen andererseits mit der Fräse ein Saatbett beliebiger Feinheit herzustellen, findet das Frässaatverfahren ohne Pflugvorarbeit größere Verbreitung. Für die Anwendung des Frässaatverfahrens ist nicht nur der Lockerungseffekt zur Saatbettbereitung von Interesse, sondern ganz besonders die Auswirkungen auf das Bodengefüge des mittleren Krumenraumes.

In diesen Versuchen war der Grobporenanteil des Saatbettes nach dem Fräsen ungepflügter Flächen meist um 3 - 5 Vol % geringer als auf gepflügten Flächen. Der Unterschied wurde durch das gröbere Aggregatgemisch auf den ungepflügten Flächen ausgelöst. Durch Verkürzung der Bissenlänge ließe sich ein feineres Aggregatgemisch herstellen, das wiederum den Grobporenanteil erhöhen würde. Eine stärkere Sackung und Verschlämmung des gefrästen Bodens gegenüber konventionell bestellter Fläche, wie sie von HOLLDACK, NITZSCH 1926 (59), GADE, 1929 (48), FEUERLEIN, 1957 (39)

und KOHLER 1960 (69) beobachtet wurde, trat bei den Versuchsböden nicht auf. Dies ist auch nicht zu erwarten, da die organische Substanz, die beim Pflügen auf eine Tiefe von 25 cm verteilt wird, beim Fräsen in den oberen 6 - 8 cm angereichert wird und somit stabilisierend auf das Bodengefüge wirkt (KAHNT 1969 (64), MUSHTAQ 1973 (73).

Durch das Fräsen wurde die Bodenschicht unter der Bearbeitungsgrenze verdichtet. Diese sogenannte Frässohle hatte einen geringeren wachstumshemmenden Effekt als eine Pflugsohle, da sich bereits im Laufe eines Winters die durch das Fräsen hervorgerufene Verdichtung auflockert. Durch die geringe Tiefe der Frässohle kommen die witterungsbedingten Lockerungsprozesse (Frost, Schrumpfung und Quellen), aber auch die höhere biologische Aktivität und das dichtere Wurzelsystem stärker zur Wirkung als in der tiefergelegenen Pflugsohle. Dennoch war der Grobporenanteil im mittleren Krumenraum zu Beginn der Vegetationsperiode um 5 bis 10 Vol % geringer als in den gepflügten Böden.

Das Pflügen mit dem Scharpflug erhöhte den Grobporenanteil im Aueboden um etwa 5 Vol %, das Pflügen mit dem Kreiselpflug um 10 Vol %. In der Pseudogley-Ackerbraunerde trat zwischen Schar- und Kreiselpflug kein Unterschied auf. Während der Vegetationsperiode vermindert sich zwar das Grobporenniveau, der Unterschied zwischen Schar- und Kreiselpflug blieb jedoch in dem relativ stabilen Aueboden erhalten. FEUERLEIN 1964 (41) und FREUND 1968 (47) beobachteten, daß sich das Bodengefüge nach dem Pflügen mit dem Kreiselpflug stärker setzte als nach dem Scharpflug. Dies ist der gleiche Effekt wie beim Tieffräsen. Die bessere Krümelung des Kreiselpfluges brachte im mittleren Krumenraum zunächst eine höhere Porosität, die aber durch das Fehlen stützender Grobschollen in einem unstabilen Boden bereits während des Winters verlorenging (Pseudogley-AB).

Bei einem Verzicht auf das Pflügen strebt das Bodengefüge einem physikalischem Gleichgewicht zu, das durch die Textur bestimmt wird (RENGER, HENSELER 1972 (90), SCHEFFER-SCHACHTSCHABEL 1970 (99). Im sandigen Lehm hatte sich ein Grobporenniveau von 12-14 Vol % eingestellt, im tonigen Lehm eines von 8 - 10 Vol %. Während im sandigen Lehm der Grobporenanteil in einem für das Wachstum noch ausreichenden Bereiches lag, hatte er im tonigen Lehm den Schwellenwert von 10 Vol % zum Teil unterschritten. In einem niederschlagsreichen Jahr könnte sich die dichte Lagerung nachteilig für die Wurzelausbreitung auswirken. Daraus folgt, daß in einem leichten Boden mit relativ hoher Stabilität eher auf das Pflügen verzichtet werden kann als in einem schweren Boden.

Durch das Pflügen wird der Boden nicht nur gelockert, sondern auch verfestigt. So hat sich unter der Bearbeitungsgrenze in nahezu allen Ackerböden ein Verdichtungshorizont (Pflugsohle) gebildet, der mehr oder weniger wachstumshemmend ist. In der Pflugsohle der Versuchsböden wurde durch das Pflügen der Grobporenanteil um bis zu 5 Vol % vermindert. Das Ausmaß der Verdichtung war meist vom Bodenzustand abhängig, sodaß die durch Bodenfeuchte oder Lagerungsdichte hervorgerufenen Unterschiede größer waren als die durch Schar- und Kreiselpflug verursachten. Die von FEUERLEIN 1964 (41) und FREUND 1968 (47) gemachte Beobachtung, daß der Kreiselpflug das Bodengefüge weniger verfestigt als der Scharpflug, konnte nicht bestätigt werden. Es ist auch technisch nicht zu erklären, daß das rotierende Tellerschar des Kreiselpfluges einen geringeren Druck auf den Boden ausübt als das starre Schar des Streichblechpfluges.

Auch in der Pflugsohle strebt das Bodengefüge einem physikalischen Gleichgewicht zu. Es lockert sich im gleichen Ausmaß auf, wie es zuvor verdichtet wurde (BERNARD 1964 (16), HANUS 1968 (55)). Die Frage, ob sich die Auflockerung der Pflugsohle bei einem

mehrjährigen Pflugverzicht fortsetzt, kann nicht eindeutig beantwortet werden, da Quellungs- und Schrumpfungsprozesse Auflockerungserscheinungen überlagern. So war der Grobporenanteil im Frühjahr bei höherem Wassergehalt geringer als im Herbst. Eine Tendenz der Auflockerung deutete sich im Aueboden an. Unabhängig vom Grobporenanteil war im vierten Jahr des Pflugverzichtes eine gesicherte Zunahme der Durchlässigkeit zu beobachten, d.h., daß sich nach einem Pflugverzicht die Lagerungsdichte nicht verändert, wohl aber in mehreren Jahren die vertikale Porenkontinuität erhöht wird. In der Pseudogley-Ackerbraunerde war nach zwei Jahren eine Zunahme der Durchlässigkeit noch nicht zu erkennen.

Faßt man alle Auswirkungen eines Pflugverzichtes zusammen, dann hat sich im Aueboden (sL) kein für das Pflanzenwachstum ungünstiges Bodengefüge entwickelt, in der Pseudogley-Ackerbraunerde (tL) lagen jedoch die physikalischen Bodeneigenschaften in einem für das Pflanzenwachstum bisweilen schon nachteiligen Bereich. Wenn man also auf das Pflügen verzichten will, muß man die Bodenart und den Bodentyp berücksichtigen.

Wird jedoch gepflügt, dann sind die Auswirkungen der Minimalbestellgeräte auf die physikalischen Bodeneigenschaften der Krume bis zu 10 cm Tiefe von denen des konventionellen Bestellverfahrens kaum verschieden. Voraussetzung für den Einsatz der Minimalbestellgeräte ist aber die Möglichkeit zur Veränderung der Zerkleinerungsintensität eines Gerätes.

6. Zusammenfassung

Aufgabe dieser Arbeit war es, die Auswirkungen der Minimalbestellgeräte auf die physikalischen Bodeneigenschaften zu untersuchen, um die Auswirkungen einer mehrjährigen Anwendung bei unterschiedlichen Boden- und Witterungsverhältnissen zu ermitteln und daraus Empfehlungen zu erarbeiten. Hierzu wurden mehrjährige Bodenbearbeitungsversuche auf drei Standorten angelegt (Aueboden, Pseudogley-Ackerbraunerde, Parabraunerde). Bei der Anlage der Versuche ging man davon aus, einen nach praktischen Erfahrungen möglichst optimalen Effekt mit den Geräten zu erzielen. Zur Erfassung der Arbeitseffekte wurde der Bodenwiderstand mit einem Penetrometer gemessen, die Aggregatgrößenverteilung nach der Bearbeitung durch Absieben bestimmt und die physikalischen Bodeneigenschaften mit Stechzylinder untersucht. Diese Methoden erbrachten folgende Ergebnisse:

1. Das zerkleinerte Aggregatgemisch, das als Gewogener Mittlerer Durchmesser (GMD) und als Zerkleinerungsgrad (ZG = 100/GMD) diskutiert wurde, war nach der Rüttelegge am feinsten, nach dem Feingrubber am gröbsten. Ein Vergleich des Zerkleinerungsgrades ergab folgende Abstufung zwischen den Geräten:
   Rüttelegge > Konvent. Kombination $\geq$ Kreiselegge > Fräse > Feingrubber
   Schar- und Kreiselpflug hatten keine unterschiedliche Wirkung auf den Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte.

2. Der Bereich des Zerkleinerungsgrades erstreckte sich von 3,5 bis 12 Einheiten. Das entspricht einem Gewogenen Mittleren Durchmesser von ca. 8 bis 30 mm. In diesem Bereich war der GMD mit dem Grobporenanteil negativ korreliert, d.h. je feiner das Aggregatgemisch war, desto größer war der Grobporenanteil. Während der Vegetationsperiode lag der Grobporenanteil im Aueboden zwischen 20 und 35 Vol%, in der Parabraunerde zwischen 18 und 30 Vol%, in der Pseudogley-Ackerbraunerde zwischen 10 und 25 Vol %. Wenn man einen

Grobporenanteil von 10 bis 15 Vol% für ausreichend annimmt, dann war durch kein Gerät ein ungünstiges Bodengefüge erzeugt worden.

3. Der Wassergehalt zum Zeitpunkt der Bestellung hatte einen großen Einfluß auf den Zerkleinerungseffekt der Geräte. Die Bearbeitbarkeit wird durch die Bindungsintensität des Wassers bestimmt und liegt zwischen den pF-Werten von 2,0 und 2,6. In einem Fräsversuch wurde eine parabolische Beziehung zwischen Bodenfeuchte und Zerkleinerungsgrad nachgewiesen. Bei einer Feuchte von 15 Gew.% wurde ein sandiger Lehm am feinsten zerkleinert. Zur Herbstbestellung lag der Wassergehalt meist über den für die Bearbeitung günstigen Bereich, der im Aueboden bei 16 Gew.%, in der Parabraunerde und in der Pseudogley-Ackerbraunerde bis 20 Gew.% liegt.

4. Unter Berücksichtigung des Aufganges und der physikalischen Eigenschaften ist für mittelschwere Böden, die nicht zur Verschlämmung neigen, ein Aggregatgemisch mit einem Gewogenen Mittleren Durchmesser von etwa 10 mm zu empfehlen. Am nächsten kam dieser Feinheit die Rüttelegge, deren Zerkleinerungseffekt von der Bearbeitbarkeit nur wenig beeinflußt wurde. Die Zerkleinerung durch die Kreiselegge war von der Bearbeitbarkeit stärker abhängig. Bei hoher Bodenfeuchte war die Zerkleinerung sehr grob. Der Zerkleinerungseffekt der Fräse und des Feingrubbers war zu jedem Bearbeitungstermin am geringsten. Während die Fräse durch Verkürzung der Bissenlänge ein feineres Aggregatgemisch herstellen kann, ist eine feinere Zerkleinerung mit dem Feingrubber nicht möglich. Der Einsatz des Feingrubbers ist deshalb nur für günstige Bearbeitbarkeit zu empfehlen.

5. Der spezifische Zerkleinerungsaufwand lag in einem Bereich zwischen 10 und 50 $\cdot$ 10^3 (kJ/m^2). Die Reihenfolge der Geräte war:

$$\text{Feingrubber} \leq \text{Rüttelegge} < \text{Fräse} < \text{Kreiselegge}$$

Der Feingrubber und die Rüttelegge hatten einen in etwa gleichen spez. Zerkleinerungsaufwand. Im Durchschnitt war das Verhältnis des spez. Zerkleinerungsaufwandes dieser beiden Geräte zur Fräse 1: 2, das zur Kreiselegge 1: 3. Der hohe spezifische Zerkleinerungsaufwand der Kreiselegge ist auf die hohe Umlaufgeschwindigkeit der Zinken zurückzuführen, die mit 3,27 m/s weit über der Werkzeuggeschwindigkeit der Rüttelegge lag.

6. Auf ungepflügtem Boden erzeugte die Fräse ein rauheres Saatbett als auf gepflügtem Boden. Die physikalischen Eigenschaften des Saatbettes waren jedoch in beiden Fällen ausreichend für eine günstige Entwicklung des Bodengefüges und für das Pflanzenwachstum. Unter der Bearbeitungsgrenze bildete sich ein Verdichtungshorizont (Frässohle), der im Laufe des Winters nahezu ganz aufgelockert wurde. Der Grobporenanteil der ungepflügten Krume war gegenüber der gepflügten um 5 - 10 Vol% geringer. Die Pflugsohle war auch im 4. Jahr nach dem letzten Pflugeinsatz eindeutig festzustellen. Nur die Durchlässigkeit hatte sich geringfügig erhöht.

7. Schar- und Kreiselpflug hatten keinen differenzierenden Einfluß auf den Effekt der Bestellgeräte. Der Zerkleinerungseffekt der Bestellgeräte überdeckte die unterschiedliche Rauheit zwischen Schar- und Kreiselpflug. Weder im Zerkleinerungsgrad noch bei physikalischen Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Tiefe konnten statistisch abgesicherte Unterschiede ermittelt werden.

8. Im Gegensatz zum Saatbett war im mittleren Krumenraum (10 - 20 cm)Tiefe) der Grobporenanteil nach dem Kreiselpflug um maximal 5 Vol% höher als nach dem Scharpflug. Hier tritt deutlich die feinere Krümelarbeit des Kreiselpfluges hervor, die zum Teil bis in den Herbst erhalten bleibt.

9. Die Verfestigung der Pflugsohle hatte nach Schar- und Kreiselpflug das gleiche Ausmaß. Eine geringere Pflugsohlenausbildung durch den Kreiselpflug bestätigte sich nicht. Durch unterschiedliche Bodenfeuchte oder Lagerungsdichte wurden demgegenüber größere Verdichtungsunterschiede hervorgerufen.

7. Literaturzusammenstellung

1. Blake G.R., Aldrich R.J.: 1955: Effects of cultivation on some physical properties on potatoe and corn yield
   Soil Sci, Soc.Amer.Proc. 19: 400-403

2. Arndt W.: 1966: Traffic compaction of soil and tillage requirements. VI. The effect of traffic compaction on a number of soil properties.
   J. agri. Engng.Res. 11/3: 182-187

3. Arnott R.A., Clement C.R.: 1966: The use of herbicides in alternate husbandry as a substitute for ploughing.
   Weed Res. 6: 142 - 157

4. ASAE Recommendation: 1973: R313.1 Soil cone penetrometer
   Agricultural Engeeneers Yearbook 335 - 336

5. Atterberg A.: 1912: Die Konsistenz und die Bindigkeit der Böden
   Int.Mitteilungen f.Bodenkunde 2: 149 - 189

6. Atterberg A.: 1914: Die Konsistenzkurven der Mineralböden
   Int.Mitteilungen f.Bodenkunde 4: 418 - 431

7. Bachthaler G.: 1967: Verfahren der pfluglosen Ackerkultur durch Anwendung von Spezialherbiziden.
   Bayer.Landw.Jahrbuch 44: 516 - 534

8. Baeumer K.: 1969: Die Standortfaktoren Boden und Klima bei pflugloser Bestellung.
   Merck-Blätter 20/1: 32 - 37

9. Baeumer K., Ehlers W., Pape G.: 1971: Erste Erfahrungen im Ackerbau ohne Bodenbearbeitung in Göttingen.
Landw.Forsch.Sonderh. 26/1: 264-272

10. Brunnacker K.: 1963: Bodenkunde von Bayern Bltt Nr. 7536 Freising Nord. 1 : 25 000 mit Erläuterungen.

11. Baver L.D.: 1930: The effect of organic matter upon several physical properties of soils.
J.Amer.Soc.Agron. 22: 703 - 708

12. Baver L.D.: 1949: Practical values from physical analysis of soils.
Soil Sci. 68: 1 - 14

13. Baver L.D.: 1956: Soil physics
John Wiley u.Sons, New York
Chapman u.Hall, London
3. Auflage

14. van Bavel C.H.M.: 1950: Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14: 20

15. Baumgart H.C. 1967: Die Bestimmung der Wasserleitfähigkeit k_f von Böden mit tiefliegender Grundwasseroberfläche.
Diss. TH Hannover

16. Bernard Helmut: 1964: Untersuchungen an Pflugsohlenverdichtungen mit verschiedenen Methoden
Diss. Uni Bonn

17. Beyer H.: 1933: Vergleichende Untersuchungen auf verschiedenen mit Pflug und Fräse bearbeiteten Böden.
Diss. Uni Leipzig

18. Blake G.R.: 1964: Minimum Tillage: Bodenbearbeitung, Bestellung und Pflege mit geringstem Aufwand ohne Ertragsminderung.
Grundlagen der Landtechn. 19: 5-10

19. Boekel P.: 1963: Soil structure and plant growth.
Neth. J. agric.Sci. 11: 120-127

20. Boguslawski v. E., Lenz K.O.: 1958: Untersuchungen über mechanische Widerstandsmessungen mit einer Rammsonde auf Ackerböden. (1.Mitteilung)
Z.Acker- und Pflanzenbau 106: 245-256.

21. Boguslawski v.E., Lenz K.O.: 1960: Die Ertragsbildung in Abhängigkeit von Porenvolumen und Bodenwiderstand.
Z.Acker-u.Pflanzenbau 110: 379-392

22. Bornemann: 1922: Bodenphysikalische Studien zur Fräskultur
Dt. Landw. Presse 49: 321-322/344

23. Bosse O., Herzog R.: 1969: Wirkungen unterschiedlich intensiver Bodenbearbeitungsverfahren. 3. Mitteilung: Wirkungen auf Merkmale der Pflanzenentwicklung
Thaer-Archiv 13/12: 1141-1159

24. Bowers W., Batemann H.P. 1960: Research Studies of Minimum Tillage
Trans.ASAE 3(2): 1-3, 12

25. Buhtz E., Bosse O., Herzog R., Waldschmidt U.: 1970: Ergebnisse zur Rationalisierung der Grundbodenbearbeitung. Thaer-Archiv 14: 795 - 812

26. Chang C.W.: 1949: Effect of longtime cropping on soil properties in north-eastern New Mexico. Soil Sci. 69: 359 - 368

27. Currie 1970: Movement of gases in soil respiration Sorption and transport processes in soils. Soc.chem.ind.,Monograph, London

28. Culpin C.: 1936: Studies on the relation between cultivation impements, soil structure and crop. J. agr. Sci. 26: 45 -

29. Czeratzki W.: 1964: Nachbearbeitungsgeräte zur Bodenbearbeitung. Landtechnik 19: 562 - 564

30. Czeratzki W., Ruhm E.: 1971: Ergebnisse aus Versuchen mit bearbeitungsloser Bestellung. Landw.Forsch.Sonderheft 26/1: 281-289

31. De Boodt M., De Leenheer L., Kirkham D.: 1961: Soil aggregate stability indexes and crop yields. Soil Sci. 91: 138 - 146

32. Debruck J.: 1969: Was ist Minimalbodenbearbeitung? Mitt. der DLG 8: 194 - 198

33. Dojarenko zit. Krause M.: 1931: Russische Forschungen auf dem Gebiete der Bodenstruktur. Landwirtschaftl.Jahrbücher 73: 603 - 690

34. Ehlers W., Pape G., Böhm W.: 1972: Tiefenverteilung und zeitliche Änderungen der laktatlöslichen Kalium- u. Phosphatgehalte während einer Vegetationsperiode in unbearbeiteten und bearbeiteten Böden.
Z.Pflanzenern.,Bodenkunde 133: 24 - 36

35. Ehlers W.: 1973: Water infiltration in tilled and untilled loess soil.
6. Intern.Conference on Soil Till.

36. Eisenhart C.: 1951: Assumptions underlying the analysis of variance.
Biometrics 3: 17 - 32

37. Estler M.: 1970: Die Technik der Minimalbodenbearbeitung.
Landmasch.Rundschau 22: 6 - 9

38. Fanning D.S., Brady N.C.: 1963: An evaluation of the plow-plant method of corn planting.
Agron. J. 55: 348 - 351

39. Feuerlein W.: 1957: Die Fräse im landwirtschaftlichen Einsatz.
Grundlagen d.Landtechn. 9: 88-98

40. Feuerlein W.: 1964: Die Minimal-Bodenbearbeitung
Landtechnik 20: 184 - 188

41. Feuerlein W.: 1964: Der Kreiselpflug und seine Möglichkeiten.
Landtechnik 19: 355 - 359

42. Feuerlein W.: 1971: Minimalbodenbearbeitung - ihre Möglichkeiten und Grenzen.
Landtechnik 27: 117 - 121

43. Franken H.: 1969: Die Zusammensetzung der Bodenluft im Wurzelbereich einiger Ackerböden.
2. Mitteilung
Z.Acker-u.Pflanzenbau 130: 110-121

44. Free G.R.: 1960: Minimum tillage for soil and water conservation.
Agri.Eng. 41: 96 - 99

45. Free G.R., Fertig S.N., Bay C.T.: 1963: Zero tillage for corn following sod.
Agr. Journ. 55: 207 - 208

46. Frei E., Keller E.: 1953: Strukturbeurteilung in der Ackerschicht mit Hilfe der Rammsonde.
Landw.Jahrb.Schweiz 2: 581-

47. Freund K.L.: 1968: Die Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsmethoden auf die physikalischen Eigenschaften einer Parabraunerde.
Diss. Uni Bonn

48. Gade K.: 1929: Einfluß von Fräse und Pflug auf den Bodenzustand und Ertrag.
Diss. Halle, Landw.Jahrbuch 70: 89 - 142

49. Gallwitz K., Breitfuß J.: 1953: Vergleichende Untersuchungen an Bodenfräswerkzeugen in zwei Modellböden.
Landtechn.Forsch. 3: 125 - 129

50. Gallwitz K.: 1957: Arbeitsaufwand und Krümelbildung von Fräswerkzeugen.
Grundlagen der Landt. 9: 54 - 57

51. Grable A.R., Siemer E.G.: 1968: Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxigen diffusion, r edox p otentials, and elongation of corn roots.
Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 32: 180 - 186

52. Grote G.F.: 1954: Untersuchungen über die Einwirkung rotierender Bodenbearbeitungswerkzeuge auf Boden und Pflanze.
Z.Acker-u.Pflanzenbau 97: 155 - 176

53. Hansen C.M., Robertson L.S., Grisby B.H.: 1959: Plow-Plant equipment designed for corn production.
Trans. of ASAE: 2 (1): 65 - 67

54. Hanus H.: 1964: Eine Methode zur seriemäßigen Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit.
Mitt.Deut.Bodenkundl.Ges. 2: 159 - 167

55. Hanus H.: 1968: Die Verstärkung von Unterbodenverdichtungen durch Maßnahmen der Bodenbearbeitung.
Landw.Forschung, Sonderheft 22: 78 - 84

56. Hartge K.H.: 1971: Die physikalische Untersuchung von Böden.
F.Enke-Verlag, Stuttgart

57. Hartge K.H.: 1967: Luftpermeabilität verschiedener Porenbereiche.
Z.Pflanzenernähr.u.Bodenk. 120: 31 - 45

58. Henin M.S.: 1931: Quelques resultats obtenus dans l`étude des sols á l`aide de la sonde dynamometrique de Démolin-Henin.
Bodenkundl. Forschung 5/1: 1

59. Holldack H., Nitzsch v.W.: 1926: Der Einfluß der Bodenbearbeitung auf den Flächenertrag der Kulturen.
Ill. Landw.Zeitg. 46/ 13

60. Hood A.E.M.: 1965: Der Einsatz von Paraquat als Alternative zum Pflügen.
Z. Pflanzenkrankheiten, Pflanzensch. Sonderheft III: 291-296

61. Jamison V.C., Weaver H.A., Reed I.F.: 1950: The distribution of tractor tire compaction effect on Cecil clay.
Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 15: 34 - 37

62. Jones J.N., Moody J.E., Shear J.M., Moschler W., Lillard J.H.: 1968: The No-tillage system for corn (Zea mays)
Agron. J. 60: 17 - 20

63. Jones J.N., Moody J., Lillard J.H.: 1969: Effects of tillage, no-tillage, and mulch on soil water und plant growth.
Agron. J. 61: 719 - 721

64. Kahnt G.: 1969: Ergebnisse zweijähriger Direktsaatversuche auf drei Bodentypen.
Z.Acker-u.Pflanzenbau 129: 277 - 295

65. Kain N.K., Agrawal J.P.: 1970: Effect of clod size in the seedbed on development and yield of sugarcne.
Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 34: 795 - 79

66. Lenz K.O.: 1957: Untersuchungen mit der Rammsonde auf Ackerböden.
Diss. Uni Gießen

67. Kmoch H.G., Mazurak A.P.: 1959: Zur Bedeutung der Methodenwahl bei Untersuchungen der Bodenporosität.
Z.Acker-u.Pflanzenbau 108: 137-148

68. Kmoch H.G., Hanus H.: 1965: Vereinfachte Methodik und Auswertung der Permeabilitätsmessung des Bodens für Luft.
Z.Pflanzenernähr.,Düng.,Bodenk. 111: 1 - 10

69. Kohler M.: 1960: Untersuchungen über die Saatbettherstellung zu Winterweizen.
Landw.Jahrb.Schweiz: 9: 115-193

70. Kuipers H.: 1961: Water content at pF 2 as characteristic in soil-cultivation research in the Netherlands.
Neth.J.agric.Sci. 9: 27 - 35

71. Kuipers H., Boone F.R.: 1970: Remarks on soil structure in relation to zero-tillage.
Neth.J.agric.Sci.18: 262-269

72. Lindner H.: 1966: Zum Problem der optimalen Bodendichte.
Alb.Thaer-Archiv 10: 1071 - 1079

73. Mushtaq M.A.: 1973: Der Einfluß von Pflugfurche, Fräsdrill- u. Direktsaat in Verbindung mit Zwischenfruchtbau auf Gefügekennwerte einer Filderlehm-Parabraunerde und den Ertrag von Winterweizen
Diss. Uni Hohenheim

74. Mangelsdorff, E.G. 1928: Experimentelle Beiträge zur Bodenbearbeitung.
Diss. Uni Halle

75. Martiny B.: 1931: Die Bodenfräse in der Landwirtschaft auf Mineralböden.
RKTL-Schriften 28, Berlin

76. Meyenburg K. von 1923: Eine registrierende Zug- und Festigkeitssonde.
Int.Mitt.f.Bodenkunde 13: 201

77. Meyer L.D., Mannering J.V.: 1959: Minimum tillage for corn. Its effect on infiltration and erosion.
Agri.Enge. 40: 72 - 75

78. Mirreh H.F., Ketcheson J.W.: 1972: Influence of soil bulk density and matric pressure on soil resistance to penetration. Can.J.Soil Sci. 52: 477-483

79. Moody J.E., Shear G.M., Jones J.N.: 1961: Growing corn without tillage. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 25: 516 - 517

80. Moter H.: 1954: Struktur- und Ertragsergebnisse des Lößlehms unter dem Einfluß verschiedener Bearbeitung und neuzeitlicher Mechanisierung der Ackerkultur. Diss. Uni Bonn

81. Musgrave R.B., Zwerman P.J., Aldrich S.R.: 1955: Plow-planting of corn. Agr.Eng. 36: 593 - 594

82. Nitzsch W.v.: 1927: Die Beziehungen zwischen Bearbeitung, Struktur und Ertrag des Ackerbodens. Wiss.Veröff.Siemens-Konzern 6, Heft 1

83. Nitzsch W.v.: 1938: Porengrößen im Boden, ihre Beziehungen zur Bodenbearbeitung und zum Wassergehalt. RKTL-Schriften: Heft 38

84. Ouwerkerk C. van: 1969: Farm mechanization and soil structure. Neth.J.Agric.Sci. 17: 20-26

85. Ouwerkerk van C., Boone F.R.: 1970: Soil-physical aspects of zero-tillage experiments.
Neth.J.agric.Sci: 18: 247-261

86. Page J.B., Willard C.J.: 1946: Cropping systems and soil properties.
Soil Sci. Soc.Amer.Proc. 11: 81

87. Philips R.E.: 1968: Minimum seedbed preparation for cotton.
Agron J. 60: 437 - 441

88. Puchner H.: 1911: Die Schollenanalyse, ein Mittel zur Bestimmung der Bodenstruktur.
Mitt. der DLG: 26: 38 - 40

89. Puchner H.: 1913: Vergleichende Untersuchungen über die Kohäreszens verschiedener Bodenarten.
Int.Mitteilungen f.Bodenkunde III: 141 - 239

90. Renger M., Henseler K.L.: 1972: Erforschung und zahlenmäßige Kennzeichnung des Staunässegrades von wasserstauenden Böden Niedersachsens.
Bericht über die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens.

91. Richards L.A., Fireman M.: 1943: Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils.
Soil Sci. 56: 395 - 404

92. Rid H.: 1956: Neue Untersuchungsergebnisse zur Frage Bodendruck.
Bayer.Landw.Jahrbuch 33/2: 145 - 175

93. Rid H.: 1958: Bodenbearbeitung und Bodenpflege.
BLV-Verlag, München, Bonn, Wien

94. Rid H.: 1962: Einfluß der Bodenbearbeitung auf die Bodenstruktur.
Landw.Forschung XV/2: 105-117

95. Rid H.: 1964: Bodenbearbeitungsgeräte mit rotierenden Werkzeugen.
Landtechnik 19: 723 - 729

96. Rid H.: 1966: Die Bodenbearbeitung: Schlüssel zur Bodenfruchtbarkeit.
Mitt.der DLG 14: 578 - 584

97. Roemer Th.: 1925: Schonung der Winterfeuchtigkeit durch Kombination von Arbeitsvorgängen.
Ill. Landw.Zeitg. 45: 89

98. Sack H.: 1966: Minimalbodenbearbeitung
Landtechnik 22: 71 - 73

99. Scheffer-Schachtschabel 1970: Lehrbuch der Bodenkunde
Ferdinand Enke-Verlag, Stuttgart 7. Auflage

100. Sekera F., Brunner A: 1943: Beiträge zur Methodik der Gareforschung.
Z.Pflanzenernähr.u.Bodenkunde 29: 169-212

101. Shear G.M., Moschler W.W.: 1969: Continuous corn by no-tillage and conventional tillage methods: a six year comparison. Agron. J. 61: 524 - 526

102. Soane B.D., Campbell D.J., Herkes S.M.: 1970: Cultivations in relation to continous barley growing. II. Soil physical conditions. Proc.Int.Conf.Tillage Res. Methods, Silsoe

103. Söhne W.: 1954: Krümel-und Schollenanalyse als ein Mittel zur Beurteilung der Güte der Bodenbearbeitung. Landtechn.Forschung 4: 79-81

104. Söhne W.: 1961: Wechselwirkungen zwischen Fahrzeuglaufwerk und Boden beim Fahren auf unbefestigter Fahrbahn. Grundlagen d.Landtechn. 13: 21 - 34

105. Stibbe E., Ariel D.: 1970: No-Tillage as compared to tillage practices in dry-land-farming of semi-arid climate. Neth. J. agr. Sci. 18: 293-307

106. Stracke W.: 1969: Ergebnisse eines Dauerversuches zur Frage der reduzierten Bodenbearbeitung. Alb.Thaer-Archiv 13: 303 - 309

107. Strickling E.: 1950: The effect of soybeans on volume weight and water stability of soil aggregates, soil organic matter content and crop yields. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 15: 30 - 34

108. Swamy Rao A.A., Hay R.C., H.P. Bateman: 1960: Effect of Minimum Tillage on physical properties of soils and crop response. Trans ASAE 3 (2): 8 - 10

109. Teuteberg W.: 1969: Pfluglose Ackerkultur Landw.Forsch.Sonderh. 23/2: 133 - 139

110. Triplett G.B., Van Doren D.M., Schmidt B.L.: 1968: Effect of corn (Zea mays) stover mulch on no-tillage corn yieldand water infiltration Agron.J.60: 236 - 239

111. Weaver H.A., Jamison V.C.: 1950: Effect of moisture on tractor tire compaction. Soil Sci. 71: 15 - 23

112. Wichtmann H.: 1956: Zur Methodik und Anwendung von Aggregatanalysen für ackerbauliche Fragen. Z.Acker-u.Pflanzenbau 100: 164 - 178

113. Williams W.R.: 1935: Theses of tenacity and cohesion in soil structure. Pedology 30: 755

114. Williamson R.E.: 1964: The effect of root aeration on plant growth. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 28: 86 - 90

115. Wolkewitz H. : 1964: Die physikalischen Eigenschaften von Böden, ihre methodische Erfassung und ihre Veränderung durch versch. Faktoren, dargestellt an Modellsubstanzen.

Habil.-Arbeit, Uni Berlin

116. Kießkalt S., Matz G.: 1951: Zur Ermittlung der spezifischen Oberfläche.

VDI-Zeitschr. 93: 58 - 60

117. Zach M., Steinkampf, Sommer C.: 1973: Arbeitseffekte und Leistungsbedarf eines Kreiselpfluges.

Landbauforsch.Völkenrode 23: 29 - 40

118. Zeltner E.: 1972: Neues auf dem Maschinensektor der Minimalbestelltechnik.

Landtechnik v. morgen (Schlüterserie) 12: 26 - 33

119. Zeltner E., Estler M.: 1973: Leistungsbedarf von Maschinen für die Minimal-Bestelltechnik.

Jahrestagung Landtechnik, Weihenstephan 1: 90 - 99

120. Zeltner E.: 1975: Betriebstechnische und pflanzenbauliche Aspekte verschiedener Minimalbestellverfahren.

Diss. TU München-Weihenstephan

121. Locatelli, zit. Hupfauer M.: 1972: Sämaschinen.

Landtechnik Weihenstephan 4: 49 - 56

122. Hock A.: 1955: Klimakarte von Bayern 1 : 2 500 000

123. Vogel F., Brunnacker K.: 1964: Bodenkundliche Übersichtskarte von Bayern. 1 : 500 000

Bayer.Geol.Landesamt, Müchen

8. Anhang

8.1 Beschreibung der Bodentypen

8.2 Niederschlagssummenkurven

8.3 Anhangstabellen

In den Anhangstabellen verwandte Abkürzungen

konv.	:	Konventionelle Gerätekombination
Kreisel	:	Kreiselegge
Rüttel	:	Rüttelegge
Feingr.	:	Feingrubber
BW	:	Bodenwiderstand
PV	:	Porenvolumen
P $\gtrless$ 10	:	Poren $\gtrless$ 10 μ
P 10-50	:	Poren 10 - 50 μ
pk_a	:	Permeabilitätskoeffizient für Luft
WG	:	Wassergehalt bei der Probenahme
LG	:	Luftgehalt bei der Probenahme

8.1. Beschreibung der Bodentypen

R O G G E N S T E I N (Seehöhe 52o m)

Das Versuchsgut Roggenstein liegt im Bayerischen Voralpenland zwischen Olching und Eichenau. Die Bodenbildung ist durch die Ablagerungen der Amper im würmeiszeitlichen bis frühnacheiszeitlichen Zeitraum geprägt. In diesen Schottern ist der Anteil der Kalkgerölle besonders hoch. Eingewehtes, lößartiges Material hat sich in der Nähe der Versuchsfläche abgelagert. In der relativ kurzen Zeit konnte sich der Boden bis zu einer Mächtigkeit von 30 - 40 cm entwickeln. Die Versuchsfläche ist nahezu eben.

Eine Texturanalyse zeigt, daß unter der bearbeiteten Ackerzone (> 25 cm) und über der Schotterschicht (30 - 40 cm) der Tongehalt angereichert wird (Abb. 1).Der sandige Lehm geht in einen sandigen Ton über. Der Steingehalt des Restschotters liegt im A- und B-Horizont bei 15-18%.

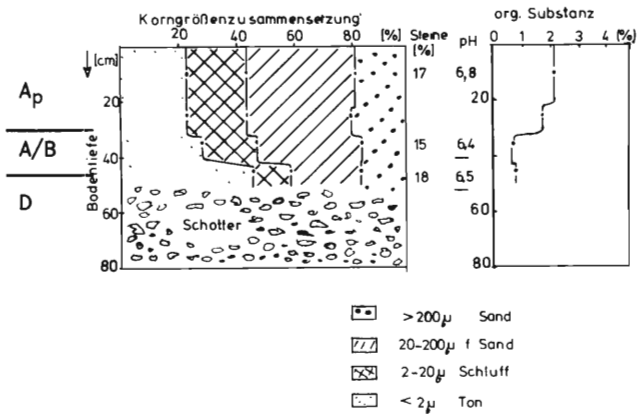

Abb. 1 Textur und org. Substanz im Bodenprofil des Auebodens (Braunerde) in Roggenstein

Die Bodentyp-Entwicklung steht hauptsächlich unter dem Einfluß des Niederschlags- und Grundwassers. So nimmt der Bodentyp der Versuchsfläche eine Zwischenstellung zwischen dem anmoorigen (organisch - mineralischen) Boden auf würmeiszeitlichen Kalkschotter (Vogel, Brunnacker 1964,(123),Leg.34)und lehmigen Sand bis Lehm, geröllführend, aus alpinem Schotter (Vogel, Brunnacker, Leg.Nr.7) ein. Während sich zu Beginn der Bodengenese im Oberboden die org. Substanz anreicherte, geriet die Weiterentwicklung nach natürlichem Absinken des Grundwasserstandes unter terrestrischen Einfluß, der in den letzten Jahrzehnten durch ein künstliches Absenken des Grundwassers gefördert wurde.

Der Bodentyp der Versuchsfläche läßt sich daher als Aueboden ansprechen, der sich unter dem terrestrischen Einfluß zur Braunerde entwickelt.

F R A N K E N D O R F (Seehöhe 53o m)

Frankendorf - 8 km nordostwärts von Erding - liegt in einem Lößgebiet. Der Löß wurde während der Würmeiszeit auf der Rißterasse abgelagert und hat eine kontinuierliche Bodenentwicklung durchgemacht. Die Versuchsfläche ist nur geringfügig nach Osten geneigt.

Die Bodenart im Ap-Horizont ist als Folge der Kornzusammensetzung des Lößes ein toniger Lehm, der im B_t-Horizont in einen lehmigen Ton übergeht.

Da das nahezu ebene Gelände von der Erosion verschont blieb, konnte sich eine typische Parabraunerde mit ausgeprägtem B_t-Horizont bilden (Abb. 2). Dieser Bodentyp zählt in Bayern zu den wertvollsten Ackerböden und steht in dieser Gegend wahrscheinlich schon sehr lange unter Ackernutzung.

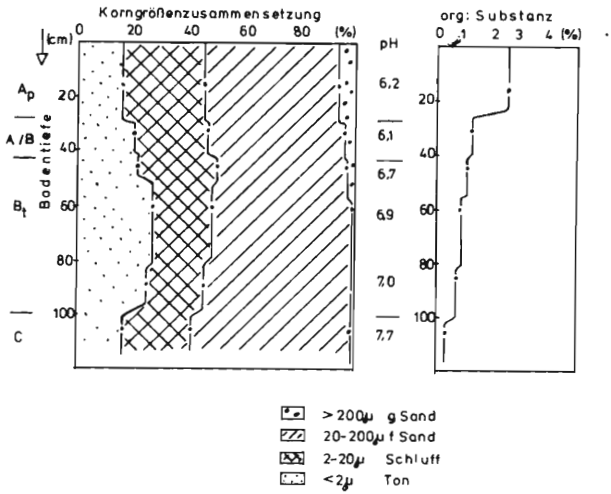

Abb. 2 Textur und org. Substanz im Bodenprofil der Parabraunerde in Frankendorf

D Ü R N A S T (Seehöhe 48o m)

Das Versuchsgut Dürnast liegt 3 - 4 km westlich von Freising im tertiären Hügelland. Als Versuchsfläche selbst wurde ein Südhang mit etwa 6 - 8 % Gefälle ausgewählt.

Die Bodenart wird durch die Korngrößenzusammensetzung des angewehten Löß bestimmt, der sich über der oberen Süßwassermolasse abgelagert hat. Sie ist im Ap-Horizont ein toniger Lehm.

Die Entwicklung des Bodentypes zeigt eine Abweichung von der zu erwartenden Richtung zur Parabraunerde. Der Löß hat sich infolge seiner leichten Erodierbarkeit, die sich am Hang und bei Ackernutzung stärker

auswirkt, nicht ungestört in diese Richtung entwickeln können. So wurde durch den Abtrag der Hanghöhe und die Ablagerung an Hangfuß der morphologische Profilaufbau derart umgeformt, daß Brunnacker, 1963 (10) diesen Bodentyp als "Ackerbraunerde" anspricht. Am Unterhang kommt es zu einer mehr oder weniger starken Überlagerung mit erordiertem Material (Abb. 3). Eisen- und Mangankonkretionen neben der Rostfleckigkeit verschiedener Schichten bestätigen die Staunässe. Der Bodentyp ist demnach eine schwach-pseudovergleyte Ackerbraunerde (Pseudogley-Braunerde).

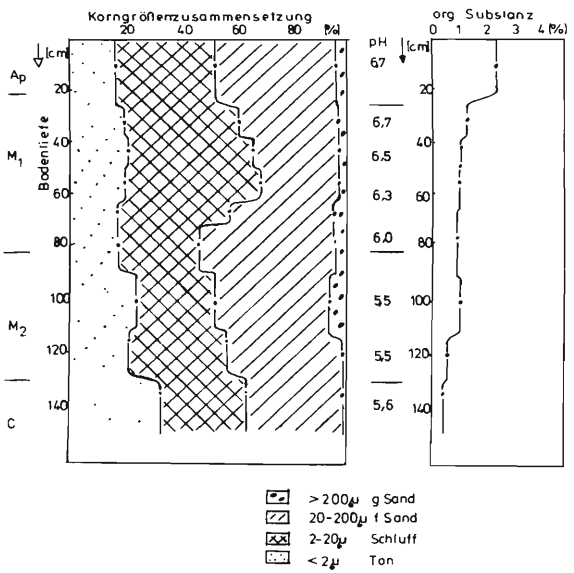

Abb. 3 Textur und org. Substanz im Bodenprofil der Pseudogley-Ackerbraunerde in Dürnast.

K R A N Z B E R G (Seehöhe 5oo m)

Kranzberg - 10 km westlich von Freising - liegt wie Dürnast im tertiären Hügelland. Im Gegensatz zu Dürnast ist hier das Ausgangsmaterial nicht der Löß, sondern das Lockersediment der oberen Süßwassermolasse. Die Versuchsfläche liegt auf einem nach Süden geneigten Hang einer Mulde.

Die Bodenart ist ein sandig-toniger Lehn, der sich aus dem sandigen Lehm der oberen Süßwassermolasse und Lößbeimischungen zusammensetzt. Der Boden entwickelte sich zu einer Braunerde geringer Basensättigung (Vogel, Brunnacker, Leg. 27), die in der Muldenmitte infolge der Tondurchschlämmung und Exposition eine leichte Staunässe anzeigt. Der Bodentyp ist eine Braunerde mit schwacher Pseudovergleyung in der Mulde.

8.2 Niederschlagssummenkurven

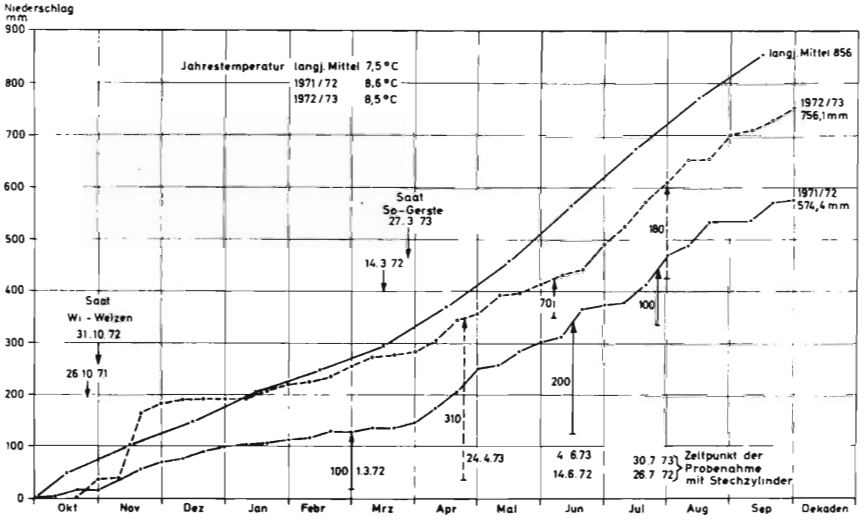

Abb. 4: Niederschlagssummenkurve von Roggenstein

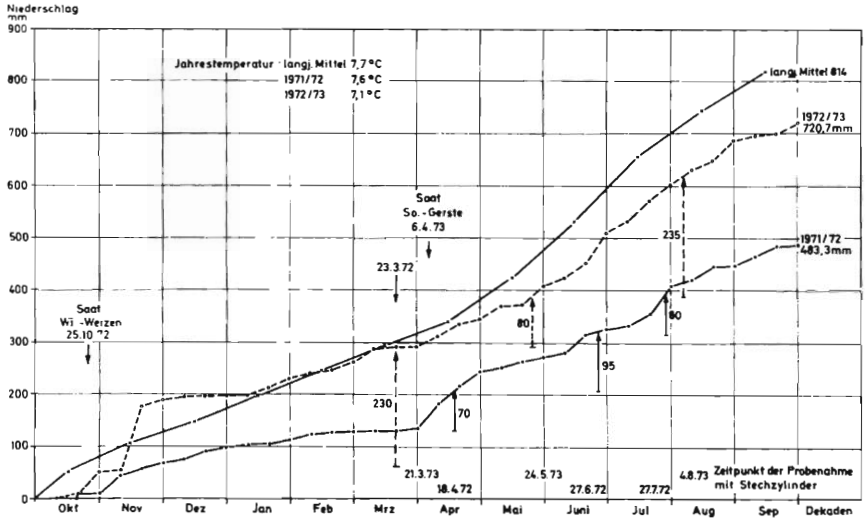

Abb. 5: Niederschlagssummenkurve von Dürnast/Weihenstephan

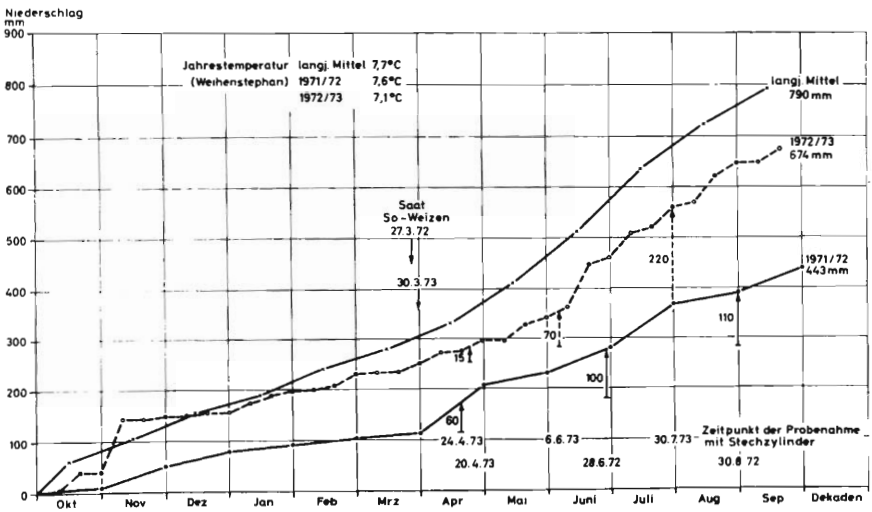

Abb. 6: Niederschlagssummenkurve von Frankendorf

Tabelle 1:

Beziehung zwischen BW und physikalischen Bodeneigenschaften
(Korrelationsmatrix)

Standort: Frankendorf (n = 112)

	BW	rt	Poren >10	Poren <10	WG (Gew.%)
BW	2,00				
rt	0,66	1,00			
Poren >10	-0,52	-0,93	1,00		
Poren <10	0,12	0,55	-0,80	1,00	
WG (Gew.%)	-0,52	-0,04ns	0,12	0,42	1,00

Standort: Dürnast (n = 88)

	BW	rt	Poren >10	Poren <10	WG (Gew.%)
BW	1,00				
rt	0,67	1,00			
Poren >10	-0,54	-0,78	1,00		
Poren <10	0,12	C,12	-0,70	1,00	
WG (Gew.%)	-0,35	0,17	-0,16	0,06ns	1,00

ns: nicht signifikant α = 1 %

Tab. 2: Die Zerkleinerungswirkung der Bestellgeräte nach Schar- und Kreiselpflug (Okt. 1972). Aggrgatgrößenverteilung: prozentualer Anteil

Roggenstein

Aggregat-größe (mm)		Konv.Kom.	Rüttel-egge	Kreisel-egge	Fein-grubber	GD 5%
> 40	Schar	10,0	0,0	19,2	10,2	6,4
	Kreisel	18,4	10,3	23,0	25,0	
	$\bar{x}$	14,2	5,1	21,1	22,6	4,5
20/40	Schar	11,2	14,8	13,7	14,6	5,3
	Kreisel	16,4	12,5	8,4	13,0	
	$\bar{x}$	13,8	13,6	11,0	13,8	3,8
10/20	Schar	30,3	36,3	26,9	29,8	4,1
	Kreisel	26,3	31,3	29,5	26,0	
	$\bar{x}$	28,3	33,8	28,3	27,9	2,1
5/10	Schar	11,2	14,0	12,0	10,6	2,3
	Kreisel	10,8	12,9	10,4	10,5	
	$\bar{x}$	11,0	13,4	11,2	10,5	1,6
3/ 5	Schar	9,5	11,1	8,7	7,9	1,4
	Kreisel	8,1	10,1	8,0	8,0	
	$\bar{x}$	8,8	10,6	8,3	8,0	1,0
2/ 3	Schar	8,3	8,6	7,0	5,9	1,3
	Kreisel	6,6	8,1	7,1	6,2	
	$\bar{x}$	7,4	8,4	7,1	6,0	0,9
< 2	Schar	19,6	15,4	12,5	10,8	3,0
	Kreisel	13,5	14,9	13,5	11,4	
	$\bar{x}$	16,5	15,1	13,0	11,1	2,1
GMD	Schar	13,2	10,4	18,2	19,4	2,7
	Kreisel	18,5	14,1	18,8	20,1	
	$\bar{x}$	15,8	12,3	18,5	20,1	1,9

Tab.3: Die Zerkleinerungswirkung der Bestellgeräte nach Schar- und Kreiselpflug (Okt. 1973). Aggregatgrößen: prozentualer Anteil

R o g g e n s t e i n

Aggregat-größe (mm)		Konv.Komb.	Rüttel-egge	Kreisel-egge	Fein-grubber	GD 5%
> 40	Schar	0,0	0,0	15,9	17,9	6,4
	Kreisel	18,9	9,6	16,2	21,1	
	x̄	9,5	4,8	16,1	24,5	4,5
20/40	Schar	20,9	24,3	11,9	17,1	5,3
	Kreisel	12,1	16,6	14,6	12,5	
	x̄	16,5	20,5	13,3	14,8	3,8
10/20	Schar	36,1	27,5	29,4	20,1	4,1
	Kreisel	25,6	28,1	27,7	24,0	
	x̄	30,9	27,8	28,6	22,1	2,1
5/10	Schar	12,7	14,6	10,6	20,8	2,3
	Kreisel	9,8	10,3	11,0	10,4	
	x̄	11,3	12,5	10,8	15,6	
3/ 5	Schar	10,5	12,2	10,4	9,7	1,4
	Kreisel	9,5	10,5	9,5	10,2	
	x̄	10,o	11,4	10,0	9,9	1,6
2/ 3	Schar	6,4	6,6	6,5	6,9	1,3
	Kreisel	6,5	7,1	6,6	6,7	
	x̄	6,5	6,9	6,6	6,8	0,9
< 2	Schar	13,4	14,8	15,4	6,8	3,0
	Kreisel	18,4	17,8	14,2	15,8	
	x̄	16,5	15,1	13,0	11,1	2,1
GMD	Schar	13,6	13,4	16,8	18,4	2,7
	Kreisel	17,0	15,3	17,5	18,5	
	x̄	15,3	14,3	17,2	18,5	1,9

Tabelle 4: Zerkleinerungswirkung der Fräsen. Aggregatgrößen: prozentualer Anteil

Standort: Roggenstein

Aggregatgröße		Fräse (H)*	Fräse (H)**	Fräse (R)**
> 40	Okt. 1972	18,4	29,8	31,7
	Okt. 1973	17,3	27,6	27,0
20/40	Okt. 1972	16,4	28,0	23,4
	Okt. 1973	17,4	14,5	21,2
10/20	Okt. 1972	26,3	24,2	23,5
	Okt. 1973	9,8	23,2	24,9
5/10	Okt. 1972	10,8	6,7	7,0
	Okt. 1973	12,4	7,6	8,0
3/ 5	Okt. 1972	8,1	4,0	4,8
	Okt. 1973	19,4	7,0	6,7
2/ 3	Okt. 1972	6,6	3,0	3,6
	Okt. 1973	14,4	5,6	4,4
< 2	Okt. 1972	13,5	4,4	6,0
	Okt. 1973	9,3	14,5	7,9
GMD	Okt. 1972	18,5	27,1	26,6
	Okt. 1973	16,6	21,8	23,9

* nach dem Scharpflug

** ohne Pflügen

Tabelle 5: Die Zerkleinerungswirkung der Bestellgeräte nach Schar- und Kreiselpflug (Okt. 1972). Aggregatgrößen: prozentualer Anteil

Dürnast

Aggregat-größe (mm)		Konv. Komb.	Kreisel-egge	Fein-grubber	Fräse (H)	GD 5%
> 40	Schar	12,5	15,1	27,0	21,5	6,3
	Kreisel	11,3	11,4	17,5	25,5	
	$\bar{x}$	11,9	13,2	22,2	23,5	4,4
20/40	Schar	15,1	14,5	21,2	19,7	5,9
	Kreisel	19,7	15,3	22,7	13,9	
	$\bar{x}$	17,4	14,9	21,0	17,7	4,1
10/20	Schar	29,9	28,6	24,9	23,9	5,0
	Kreisel	26,6	26,0	27,0	23,3	
	$\bar{x}$	28,2	27,3	25,5	23,6	3,5
5/10	Schar	10,5	11,5	7,9	9,2	1,4
	Kreisel	10,3	11,3	9,8	10,1	
	$\bar{x}$	10,4	11,4	8,9	9,7	1,0
3/ 5	Schar	9,0	9,6	6,7	7,8	1,1
	Kreisel	8,9	9,6	8,4	8,6	
	$\bar{x}$	8,9	9,6	7,5	8,2	0,8
2/ 3	Schar	7,3	7,1	4,4	5,4	0,8
	Kreisel	7,6	8,4	5,7	6,8	
	$\bar{x}$	7,4	7,7	5,0	6,1	0,6
< 2	Schar	15,7	13,6	7,9	10,7	1,5
	Kreisel	15,7	18,0	9,9	11,9	
	$\bar{x}$	15,7	15,8	8,9	11,3	1,1
GMD	Schar	15,7	16,6	23,9	21,2	2,4
	Kreisel	15,9	14,7	19,8	20,8	
	$\bar{x}$	15,8	15,7	21,8	21,0	1,8

Tab. 6: Die Zerkleinerungswirkung der Bestellgeräte nach Schar- und Kreiselpflug (Nov. 1973). Aggregatgrößen: prozentualer Anteil

D ü r n a s t

Aggregat-größe (mm)		Konv.Komb.	Kreisel-egge	Fein-grubber	Fräse (H)	GD 5%
> 40	Schar	30,5	27,9	26,4	31,1	6,3
	Kreisel	17,9	16,2	34,9	25,6	
	x̄	24,2	22,0	30,6	33,4	4,4
20/40	Schar	20,2	18,5	25,7	24,2	5,9
	Kreisel	26,4	25,6	25,4	28,7	
	x̄	23,2	22,0	25,6	26,4	4,1
10/20	Schar	27,0	29,7	30,9	25,9	5,0
	Kreisel	29,2	39,9	28,5	23,5	
	x̄	28,1	34,8	29,7	24,7	3,5
5/10	Schar	8,9	8,9	7,1	8,1	1,4
	Kreisel	9,8	7,2	4,8	5,0	
	x̄	9,3	8,0	6,0	6,5	1,0
3/ 5	Schar	6,2	7,2	4,7	5,4	1,1
	Kreisel	7,5	5,1	3,1	3,2	
	x̄	6,8	6,1	3,9	4,3	0,8
2/ 3	Schar	3,3	3,6	2,4	2,3	0,8
	Kreisel	4,2	2,5	1,3	1,7	
	x̄	3,7	3,0	1,9	2,0	0,6
< 2	Schar	3,9	4,3	2,8	3,0	1,5
	Kreisel	5,3	3,5	1,9	2,3	
	x̄	4,6	3,9	2,3	2,7	1,1
GMD	Schar	24,5	23,3	24,7	25,7	2,4
	Kreisel	21,1	21,3	27,8	28,4	
	x̄	22,8	22,3	26,2	27,0	1,8

Tabelle 7: Zerkleinerungswirkung der Fräsen* und Rüttelegge **.
Aggregatgrößen: prozentualer Anteil

Standort: Dürnast

Aggregatgröße		Fräse (H) *	Fräse (R) *	Rüttelegge **
> 40	Okt. 1972	34,4	27,6	11,0
	Nov. 1973	33,9	42,3	3,0
20/40	Okt. 1972	26,0	19,4	11,0
	Nov. 1973	25,6	29,8	24,6
10/20	Okt. 1972	21,4	27,5	32,2
	Nov. 1973	26,3	19,7	36,6
5/10	Okt. 1972	5,8	7,0	11,8
	Nov. 1973	4,9	3,0	30,8
3/ 5	Okt. 1972	4,3	5,9	9,5
	Nov. 1973	3,4	1,9	7,6
2/ 3	Okt. 1972	2,6	3,6	8,0
	Nov. 1973	2,2	1,1	4,7
< 2	Okt. 1972	5,5	9,0	16,5
	Nov. 1973	3,6	2,1	2,6
GMD	Okt. 1972	27,4	23,5	14,1
	Nov. 1973	27,2	31,1	14,9

* ohne Pflügen

** nach dem Scharpflug

Tabelle 8: Zerkleinerungswirkung der Bestellgeräte nach dem Scharpflug.
Aggregatgrößen: prozentualer Anteil

Standort: Frankendorf

Zeitpunkt: März 1973

Aggregat-größe	konv. Komb.	Rüttel-egge	Kreisel-egge	Fein-grubber	Fräse (H)
> 40	-	-	-	-	-
20/40	16,3	14,5	13,9	27,0	21,8
10/20	22,3	22,0	20,9	21,6	22,6
5/10	8,3	7,1	9,9	9,6	9,9
3/ 5	8,2	7,8	10,3	8,9	9,5
2/ 3	8,8	8,6	10,6	7,9	9,1
< 2	36,0	39,7	34,5	25,3	27,1
GMD	9,7	9,4	9,5	11,0	10,5

Tabelle 9: Leistungsaufwand (P), Zerkleinerungsgrad (ZG) und Fahrgeschwindigkeit (v) der Bestellgeräte zu verschiedenen Bearbeitungsterminen

Vorarbeit : Scharpflug

Bearbeitungs-termin	Gerät	P (kw)	ZG · 10^{-3} (1/m)	v (m/s)
Dürnast Okt. 1972	Feingrubber	12,8	4,27	1,60
	Rüttelegge	19,9	7,06	1,19
	Fräse	23,3	4,92	1,50
	Kreiselegge	28,9	6,18	1,15
Dürnast Nov. 1973	Feingrubber	12,7	4,13	1,54
	Rüttelegge	15,1	6,87	0,94
	Fräse	23,6	3,94	1,02
	Kreiselegge	60,6	4,37	1,46
Roggenstein Okt. 1973	Feingrubber	18,3	5,70	2,22
	Rüttelegge	18,5	7,50	1,45
	Fräse	26,8	7,20	1,61
	Kreiselegge	40,1	6,10	1,46

Tabelle 10: Physikalische Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung
Standort: Roggenstein Versuchsjahr: 1972

		Scharpflug				Kreiselpflug				ohne Pflügen	
		Konv.	Kreisel	Fräse	Feing.	Konv.	Kreisel	Fräse	Feing.	Fräse(H)	Fräse(R)
PV Vol%	März	52,6	53,0	54,6	53,1	52,3	56,3	-	54,2	55,2	51,6
	Juni	48,6	50,7	48,5	49,5	50,2	53,0	-	50,0	50,9	51,9
	August	47,2	47,5	49,0	48,8	50,6	49,3	-	49,3	51,4	50,9
P > 10 µ Vol%	März	34,4	35,8	36,4	36,8	34,6	39,0	-	36,9	37,1	33,9
	Juni	27,7	32,0	29,1	28,6	30,2	32,3	-	30,2	29,9	31,9
	August	27,1	29,4	30,9	28,1	26,6	24,3	-	27,3	26,7	29,8
P 10 - 50 µ Vol%	März	6,5	4,7	5,1	4,9	5,2	4,2	-	4,8	6,7	7,2
	Juni	4,9	5,9	4,5	5,1	4,8	5,2	-	5,3	5,7	5,5
	August	3,6	5,3	4,3	5,0	4,4	3,8	-	4,5	7,4	4,6
pka $\lg \mu^2$	März	1,88	2,10	2,46	2,09	1,98	2,40	-	2,08	2,07	1,69
	Juni	1,54	1,95	1,82	1,65	1,83	1,77	-	1,80	1,77	1,93
	August	1,55	1,49	1,77	1,57	1,45	1,61	-	1,63	1,45	1,68
WG Vol%	März	19,7	19,0	19,5	17,5	19,1	17,8	-	17,7	19,0	19,5
	Juni	19,0	15,4	17,7	17,5	16,8	16,3	-	16,8	17,2	17,4
	August	20,8	19,7	18,8	20,9	22,4	24,1	-	21,4	23,0	21,8
LG Vol%	März	33,0	34,4	35,1	35,6	33,2	38,6	-	36,5	36,2	32,1
	Juni	29,6	35,3	30,8	32,0	33,5	36,7	-	33,2	33,7	34,5
	August	26,4	27,8	30,2	28,0	28,2	25,5	-	27,9	28,4	29,0

Tabelle 11:Physikalische Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung

Ständort:Roggenstein Versuchsjahr: 1973

		Scharpflug				Kreiselpflug			ohne Pflügen		
		konv.	Kreisel	Fräse	Feing.	Konv.	Kreisel	Fräse	Feing.	Fräse(H)	Fräse(R)
PV Vol%	März	46,9	48,0	47,5	46,4	49,9	45,2	-	48,1	45,7	48,7
	Juni	51,7	55,8	50,2	53,1	53,9	51,1	-	52,7	51,5	50,3
	August	50,3	51,8	49,2	51,8	50,7	50,9	-	53,4	45,0	46,3
P > 10 μ Vol%	März	28,4	22,6	25,6	18,2	24,7	19,8	-	25,1	20,4	22,5
	Juni	31,3	30,3	30,3	28,9	32,1	32,0	-	32,7	28,0	28,5
	August	31,9	32,1	30,8	30,4	29,3	31,1	-	33,7	18,8	20,1
P 10 - 50μ Vol%	März	5,3	4,5	4,5	3,2	3,6	4,6	-	5,6	5,4	4,6
	Juni	6,3	5,8	5,0	5,2	5,6	4,9	-	5,1	6,1	5,5
	August	6,3	6,5	6,0	5,3	4,6	4,3	-	5,0	4,6	5,1
pka lg μ^2	März	1,45	1,30	1,62	0,98	1,58	0,59	-	1,18	0,92	1,24
	Juni	1,76	1,97	1,93	1,80	1,96	1,90	-	1,97	1,67	1,71
	August	1,81	1,51	1,73	1,46	1,46	1,62	-	1,86	0,61	1,14
WG Vol%	März	17,7	25,4	20,6	27,1	24,0	24,9	-	22,5	24,1	23,5
	Juni	15,7	17,8	14,4	17,5	15,8	13,8	-	14,5	17,0	15,0
	August	17,4	20,3	17,1	19,9	20,4	19,1	-	18,1	24,4	25,7
LG Vol%	März	29,2	22,6	26,8	19,3	25,8	20,3	-	25,6	21,6	25,2
	Juni	36,0	38,0	37,8	35,6	38,1	37,3	-	38,2	34,5	35,3
	August	32,9	31,5	32,1	31,8	30,3	31,8	-	35,3	20,7	20,7

Tabelle 12: Physikalische Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung*

Standort: Frankendorf

		Versuchsjahr 1972					Versuchsjahr 1973				
		Rüttel	Kreisel	Feingr.	Fräse(H)	Fräse(R)	Rüttel	Kreisel	Feingr.	Fräse(H)	Fräse(R)
PV Vol%	April	52,6	50,4	53,6	49,9	50,8	50,0	49,2	48,7	49,4	51,6
	Juni	49,1	50,3	52,3	52,3	48,5	51,4	53,0	53,5	52,3	53,9
	August	50,0	50,5	50,7	52,1	51,3	48,1	48,7	51,1	50,2	52,0
P > 10μ Vol%	April	28,3	24,4	27,2	26,7	25,2	16,9	18,0	15,8	19,0	21,7
	Juni	29,1	25,3	28,7	25,4	26,9	29,0	30,0	27,9	26,4	29,5
	August	26,1	22,4	17,3	23,2	24,2	20,9	21,1	26,1	22,7	26,8
P 10/50μ Vol%	April	3,9	2,5	2,9	2,3	2,9	4,4	4,1	5,0	4,5	5,1
	Juni	7,1	6,6	6,6	6,3	6,7	6,6	7,4	6,8	6,8	6,7
	August	6,5	5,2	5,6	5,4	5,6	4,8	4,6	4,5	4,2	4,4
pka lg μ^2	April	1,67	1,41	1,90	1,65	1,48	0,84	0,63	-0,11	0,24	0,37
	Juni	1,60	1,44	1,65	1,55	1,21	1,46	1,08	1,33	1,48	1,65
	August	1,26	1,27	1,04	1,47	1,32	0,91	0,53	0,99	0,81	1,28
WG Vol%	April	24,1	27,6	23,7	23,9	25,4	28,5	31,4	33,4	30,4	29,7
	Juni	4,6	14,9	12,0	16,0	12,6	12,2	13,3	14,5	15,6	14,0
	August	16,5	21,2	21,1	23,2	18,4	28,7	29,1	26,3	29,0	26,6
LG Vol%	April	28,5	22,8	30,0	25,9	25,4	21,5	17,8	15,3	19,0	21,8
	Juni	39,5	35,4	40,3	36,3	36,0	39,2	39,7	39,0	37,2	40,0
	August	33,5	29,3	29,6	28,9	32,9	19,5	19,6	24,8	21,3	25,4

* Pflügen mit dem Scharpflug

Tabelle 13 : Physikalische Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung*

Standort: Kranzberg Versuchsjahr: 1972

		Rüttelegge	Kreiselegge	Fräse (H)	Fräse (R)
PV Vol%	April	51,7	48,3	48,9	51,6
	Juni	49,3	49,4	46,6	51,3
	August	50,6	44,7	46,4	47,5
P > 10 µ Vol%	April	32,5	26,5	27,4	27,2
	Juni	30,8	29,2	24,4	29,3
	August	29,6	24,0	26,3	23,1
P 10 - 50 µ Vol%	April	4,5	5,1	3,6	5,0
	Juni	8,5	6,9	7,0	7,3
	August	7,5	6,6	7,0	6,8
pka lg μ^2	April	1,81	1,40	1,73	1,73
	Juni	1,62	1,82	1,66	1,75
	August	1,56	1,32	1,46	1,14
WG Vol%	April	21,8	25,4	23,6	27,2
	Juni	9,0	11,4	15,0	12,7
	August	17,2	16,9	18,0	22,0
LG Vol%	April	29,8	22,8	25,3	24,4
	Juni	40,3	38,0	31,5	38,6
	August	33,4	27,8	28,4	25,5

* Pflügen mit dem Scharpflug

Tabelle 14: Physikalische Bodeneigenschaften in 0 - 10 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung

Standort: Dürnast Versuchsjahr: 1973

		Scharpflug				Kreiselpflug				ohne Pflügen	
		konv.	Kreisel	Fräse	Feingr.	konv.	Kreisel	Fräse	Feingr.	Fräse(H)	Fräse(R)
PV Vol%	März	49,6	47,6	50,4	47,4	46,9	49,6	48,8	50,1	48,5	50,3
	Juni	49,4	50,8	51,4	51,5	49,6	52,4	51,4	53,8	49,7	49,6
	August	43,1	45,7	42,9	46,9	45,1	44,5	47,7	52,2	45,4	46,2
P >10 µ Vol%	März	18,1	13,9	19,5	13,9	12,4	15,9	10,5	14,3	12,3	18,5
	Juni	21,0	24,7	24,4	25,5	20,9	24,4	23,4	26,7	17,8	20,1
	August	12,5	16,8	12,2	15,6	12,6	11,1	13,7	13,7	11,2	12,2
P 10 -50µ Vol%	März	4,2	4,2	3,9	4,2	3,9	3,6	3,7	3,9	3,8	4,1
	Juni	6,1	5,8	6,1	5,7	4,9	5,6	4,8	4,8	4,5	4,8
	August	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,3	3,6	3,5	4,0	4,0
pka lg μ^2	März	0,91	0,39	1,27	0,36	-0,01	0,89	0,45	0,57	0,41	1,15
	Juni	1,24	1,33	1,43	1,66	1,31	1,58	1,53	1,78	1,03	1,29
	August	-0,34	0,77	0,29	0,73	0,27	0,22	0,46	0,68	-0,78	0,59
WG Vol%	März	34,6	36,7	33,5	36,8	36,4	36,2	37,2	38,8	36,8	23,9
	Juni	20,8	17,9	19,2	19,6	22,2	22,9	22,0	20,7	24,6	21,6
	August	31,5	28,5	31,3	31,9	31,6	33,2	34,4	39,0	34,7	34,6
LG Vol%	März	15,0	10,9	16,9	10,6	10,5	13,4	11,6	11,3	11,7	26,4
	Juni	28,6	32,8	32,2	31,9	27,3	29,5	29,5	33,2	25,0	28,0
	August	11,5	17,2	11,7	15,0	13,5	11,3	13,5	13,1	10,7	11,7

Tabelle 15: Physikalische Bodeneigenschaften in 10 - 20 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung

Standort: Roggenstein

		Okt. 1972	April 1973	Okt. 1973	April 1974
PV Vol%	Scharpflug	42,2	47,1	45,7	43,5
	Kreiselpflug	43,1	48,3	42,8	45,6
	ohne Pflügen	42,1	42,5	41,1	40,1
P >10 μ Vol%	Scharpflug	15,8	19,6	17,8	15,3
	Kreiselpflug	17,0	22,3	17,9	17,9
	ohne Pflügen	14,6	16,3	13,0	12,9
P 10 - 50 μ Vol%	Scharpflug	2,7	3,0	2,3	2,3
	Kreiselpflug	2,3	3,4	2,7	2,5
	ohne Pflügen	1,5	3,7	3,8	3,5
pka lg μ^2	Scharpflug	0,80	1,23	1,02	0,92
	Kreiselpflug	0,90	1,31	0,91	0,88
	ohne Pflügen	0,79	0,73	0,63	0,25
WG Vol%	Scharpflug	28,1	26,6	27,1	28,4
	Kreiselpflug	27,0	26,0	24,8	26,4
	ohne Pflügen	27,8	25,4	28,4	24,5
LG Vol%	Scharpflug	14,1	20,5	18,2	15,1
	Kreiselpflug	16,1	22,3	18,0	19,2
	ohne Pflügen	14,3	17,2	12,7	15,6

Tabelle 16: Physikalische Bodeneigenschaften in 10 - 20 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung

Standort: Dürnast

		Okt. 1972	April 1973	Okt. 1973	April 1974
PV	Scharpflug		43,5	42,4	45,0
Vol%	Kreiselpflug	41,0	44,9	43,4	43,4
	ohne Pflügen		44,0	42,8	43,5
P > 10 µ	Scharpflug		15,7	10,3	6,4
Vol%	Kreiselpflug	11,4	16,4	11,0	6,8
	ohne Pflügen		9,6	10,5	9,5
P 10 - 50 µ	Scharpflug		3,5	4,1	3,7
Vol%	Kreiselpflug	3,3	3,6	4,3	3,8
	ohne Pflugen		3,6	4,4	3,3
pka	Scharpflug		0,45	-0,71	-1,12
lg μ^2	Kreiselpflug	0,38	0,16	-0,42	-1,22
	ohne Pflügen		0,14	0,26	-0,33
WG	Scharpflug		27,5	33,2	41,9
Vol%	Kreiselpflug	30,0	28,1	30,9	39,9
	ohne Pflügen		35,0	29,1	34,5
LG	Scharpflug		16,0	9,2	3,1
Vol%	Kreiselpflug	11,1	16,8	12,5	3,5
	ohne Pflügen		9,0	13,7	8,9

Tabelle 17: Physikalische Bodeneigenschaften in 25 - 30 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung

Standort: Roggenstein

		Okt.1972*	April 1973	Okt.1973*	April 1974
PV Vol%	Scharpflug	44,2	41,4	44,8	40,9
	Kreiselpflug	41,4	44,8	41,2	41,3
	ohne Pflügen	40,7	37,5	38,7	40,8
P >10 μ Vol%	Scharpflug	9,7	13,7	14,4	10,3
	Kreiselpflug	11,5	14,6	11,1	12,5
	ohne Pflügen	13,8	9,6	14,1	12,4
P 10 - 50 μ Vol%	Scharpflug	2,1	2,2	3,4	2,3
	Kreiselpflug	1,6	2,4	2,9	2,8
	ohne Pflügen	6,3	2,4	6,9	2,7
pka lg μ^2	Scharpflug	0,74	0,74	0,54	-0,22
	Kreiselpflug	1,00	0,64	0,14	-0,06
	ohne Pflügen	0,53	0,65	0,84	0,86
WG Vol%	Scharpflug	31,5	27,6	31,2	30,2
	Kreiselpflug	29,9	29,1	29,9	28,3
	ohne Pflügen	29,7	28,5	28,2	27,0
LG Vol%	Scharpflug	12,7	13,8	13,7	10,7
	Kreiselpflug	19,5	15,7	11,3	13,0
	ohne Pflügen	11,0	9,0	10,5	13,8

* nach dem Pflügen

Tabelle 18: Physikalische Bodeneigenschaften in 25 - 30 cm Bodentiefe nach unterschiedlicher Bearbeitung

Standort: Dürnast

		Okt. 1972*	April 1973	Okt. 1973*	April 1974
PV Vol%	Scharpflug	43,3	42,9	40,5	41,6
	Kreiselpflug	43,3	39,6	41,7	40,7
	ohne Pflügen	46,7	42,7	45,1	42,3
P >10 μ Vol%	Scharpflug	11,1	11,2	10,1	6,8
	Kreiselpflug	9,4	13,0	8,9	4,9
	ohne Pflügen	13,9	6,6	9,6	7,1
P 10 - 50 μ Vol%	Scharpflug	2,8	2,8	2,0	3,0
	Kreiselpflug	3,0	3,1	2,2	1,6
	ohne Pflügen	4,1	2,4	2,3	0,6
pka lg μ^2	Scharpflug	0,95	-0,03	0,65	-0,3
	Kreiselpflug	0,29	0,31	-0,64	-0,1
	ohne Pflügen	1,11	-0,26	0,70	-0,1
WG Vol%	Scharpflug	24,6	31,4	30,7	36,7
	Kreiselpflug	25,3	26,8	33,6	36,0
	ohne Pflügen	25,5	34,9	30,9	35,4
LG Vol%	Scharpflug	18,8	11,5	9,7	4,8
	Kreiselpflug	18,0	12,8	8,0	4,7
	ohne Pflügen	21,3	7,8	14,3	6,8

* nach dem Pflügen