

## Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand<sup>1)</sup>

WALTER CZERATZKI

Institut für Pflanzenbau und Saatgutforschung

### Einleitung

Zu den wichtigsten Aufgaben der Bodenbearbeitung zählt neben der Einmischung von Düngemitteln und Abfallstoffen in den Boden sowie der Bekämpfung von Unkräutern und Schädlingen die Befriedigung der Ansprüche, welche die Kulturpflanzen an die physikalischen Eigenschaften und Funktionen des Bodens stellen und die im Boden meist nicht in ausreichendem Maße vorhanden sind (1). Von diesen Eigenschaften und Funktionen sind für das Pflanzenwachstum von Bedeutung:

#### 1. Die Porosität des Bodens

Sie ist neben der Bodenzusammensetzung die wichtigste Einflußgröße des Wasser-, Luft- und Wärmehaushaltes des Bodens;

#### 2. Die mechanische Bodenfestigkeit

Sie ist als die wichtigste Einflußgröße des Wurzelwachstums anzusehen.

Die Einzelfaktoren der beiden Eigenschafts- und Funktionsgruppen stehen in mehr oder weniger engen Abhängigkeitsverhältnissen zueinander, die z. T. direkt aber auch indirekt proportional sind.

Die Porositätsverhältnisse eines Bodens lassen sich durch mehrere Parameter charakterisieren.

Solche Parameter sind:

- die Bodendichte
- das Gesamtporenvolumen
- die Porengrößenverteilung
- die Wasserleitfähigkeit im gesättigten und ungesättigten Bereich
- der Gasaustausch

Die Untersuchungen über die Ansprüche der Pflanzen an diese Parameter haben sich bisher vorwiegend auf die Ermittlung der Toleranzgrenzen gerichtet, bei denen eine Schädigung des Pflanzenwachstums eintritt und weniger auf die Feststellung von optimalen Bereichen.

Dies hat einen naheliegenden Grund. Denn mit der Entwicklung der Pflanzenproduktion zum mechanisierten Anbau von Dauer- und Saisonkulturen ist auch der Einfluß der mechanischen Bodenverdichtung durch den Bewirtschaftungsverkehr

auf das Pflanzenwachstum so stark in Erscheinung getreten, daß er ohne Übertreibung als eines der zentralen bodenphysikalischen Probleme betrachtet werden kann. Nicht mit Unrecht hat man die Bodenverdichtungen als die Opponenten der Bodenbearbeitung bezeichnet. Und ohne Zweifel sind durch diese Entwicklung in den letzten Jahrzehnten die mechanischen Bodenverdichtungen stärker als bodenphysikalische Störfaktoren in Erscheinung getreten als die genetischen (2).

Mit dem Vordringen der leistungsstarken Schlepper- und Ackermaschinen beginnt jedoch noch ein weiteres Porositätsproblem an Bedeutung zu gewinnen. Es ist dies die wachstumsschädliche Lockerheit des Bodens, die durch die Überlockerrungswirkung aller Bodenbearbeitungsgeräte verursacht wird und die weder durch eine natürliche noch derzeit durch eine künstliche Boden-setzung beseitigt werden kann. Daher muß bei Untersuchungen des Zusammenhanges zwischen physikalischem Bodenzustand und Pflanzenwachstum in Zukunft ein größeres Gewicht auf die Feststellung der oberen Toleranzgrenze der Porositätsverhältnisse für das Pflanzenwachstum gerichtet werden.

### Ansprüche an Bodendichte und Porosität

Bei den Untersuchungen zur Abgrenzung des bodenphysikalischen Optimalbereiches für die Pflanzenproduktion hat es sich gezeigt, daß von Autoren, die unter recht unterschiedlichen Verhältnissen gearbeitet haben, für die drei Parameter:

Gesamtporenvolumen, Luftkapazität bei 0,1 bar Bodenwasserspannung, d. h. bei Feldkapazität sowie dem Trockenraumgewicht,

verhältnismäßig übereinstimmende Werte angegeben werden (3, 4). Als Beispiel für diese Untersuchungen sind in Abbildung 1 Ergebnisse von TIMM und FLOCKER (5) wiedergegeben. Aus der Dar-

<sup>1)</sup> Vortrag anlässlich der Tagung der Gesellschaft der Freunde der FAL in der Forschungsanstalt für Landwirtschaft am 21. 2. 1972.

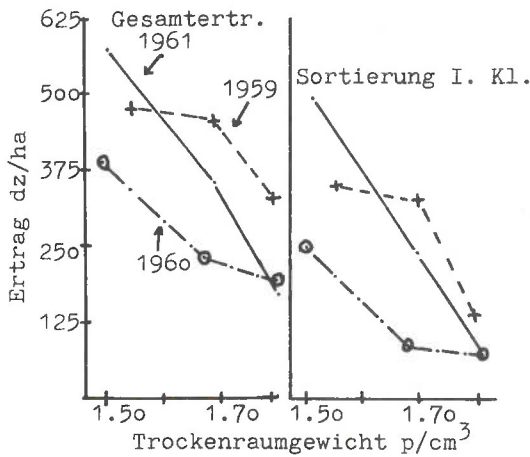


Abb. 1: Trockenraumgewicht, Ertrag und Qualität bei Kartoffeln (nach TIMM und FLOCKER)

stellung ist ersichtlich, daß bei Trockenraumgewichten über 1,50 p/cm<sup>3</sup> sowohl der Ertrag als auch die Qualität der Kartoffeln abnimmt. Eigene Untersuchungen (6) auf Lehm Böden des Braunschweiger Gebietes, zur Lage der beiden Toleranzgrenzen sowie des Optimalwertes für das Wachstum von Zuckerrüben, ergaben die in Tabelle 1 zusammengestellten Porositätswerte.

Tabelle 1: **Rübenentwicklung und Porenvolumen auf Lehm**

Entwick- lung	PV- Mittel- wert Vol. %	PV- Variation Vol. %	Saugspannung 100 cm Ws		
			WG Vol. %	LG Gew. %	Vol. %
schlecht	51,6	48,4—55,5	30,8	24,0	20,8
gut	45,3	43,6—48,9	34,8	24,0	10,5
schlecht	41,4	40,8—42,0	34,6	22,3	6,8

Aus diesen Werten ist ersichtlich, daß schlechtes Rübenwachstum sowohl auf lockerem als auch auf dichtem Boden aufgetreten ist, und daß ein Porenvolumen zwischen 44 bis 49 Vol. % ( $r_t = 1,48$  bis  $1,35$  p/cm<sup>3</sup>) und ein Luftgehalt von etwa 10 Vol. % am günstigsten für das Rübenwachstum gewesen sind.

Eine Auswertung der in der Literatur enthaltenen Ergebnisse führt zu den Durchschnittswerten von Tabelle 2.

Tabelle 2: **Optimales Porenvolumen bzw. Trockenraumgewicht für die Pflanzen**

Bodenart	Gesamt-PV Vol. %	Luftkapazität bei 0,1 at. Vol. %	Trockenraum- p/cm <sup>3</sup> Boden
Sand	40	15	1,60
Lehm	45	10	1,45
Ton	47	12	1,20

Diese Optimalwerte können unter anderem zur Beurteilung von Bodenverdichtungen in Schlepperspuren herangezogen werden. Unterstellt man, daß diese Verdichtungen bei Schleppern der Leistungsklasse 30 bis 60 PS im Durchschnitt den Werten von Tabelle 3 entsprechen, so zeigt sich, daß diese Verdichtungen bei allen Bodenarten deutlich unter

Tabelle 3: **Durchschnittswerte der Bodenverdichtung durch Schlepper der Klasse 30—60 PS**

Bodenart	Gesamt-PV Vol. %	Luftkapazität bei 0,1 at. Vol. %	Trockenraum- p/cm <sup>3</sup> Boden
Sand	38	12	1,65
Lehm	42	5	1,55
Ton	40	5	1,59

den Werten von Tabelle 2 liegen. Wie ein Vergleich von Tabelle 2 und 3 weiter zeigt, nimmt die Differenz zu Ungunsten der Schlepper-Bodenverdichtung mit der Bodenschwere noch zu. Da von dieser Verdichtung infolge der Kurzzeitigkeit des Verdichtungs Vorganges nur der luftführende Porenraum betroffen wird, führt die Bodenverdichtung zu einer Verringerung der Luftkapazität.

Allerdings läßt die Festlegung eines bodenphysikalischen Optimalbereiches für das Pflanzenwachstum mit Hilfe der Ertragsleistung die Frage nach den ursächlichen Zusammenhängen noch weitgehend offen.

Ein besseres Verständnis ist zweifellos zu erwarten, wenn als Kriterium für die Reaktion der Pflanzen auf bodenphysikalische Zustandsänderungen an Stelle der Ertragsleistung das Wurzelwachstum herangezogen wird. Denn die Wurzel ist unmittelbar den Wirkungen der bodenphysikalischen Parameter ausgesetzt, so daß sich deren Veränderungen in der Wachstumsleistung der Wurzel früher widerspiegeln müssen, als beim Ertrag. Da zudem das Wurzelsystem sich während der Entwicklungsstadien der Pflanzen morphologisch nicht so stark differenziert, wie die oberirdischen Pflanzenorgane, können Auswirkungen auf das Wurzelwachstum bereits nach kurzer Versuchsdauer festgestellt werden. Dies erleichtert die Konstanthaltung der Untersuchungsbedingungen und ermöglicht Versuche in Gefäßen.

Jedoch haben Gefäßversuche den Nachteil, daß die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf Feldversuche übertragbar sind.

Mit dieser Einschränkung sollten deshalb die folgenden Ergebnisse über den Einfluß der bodenphysikalischen Parameter auf das Wurzelwachstum betrachtet werden, da sie überwiegend mit Hilfe von Gefäßversuchen gewonnen worden sind.

Abbildung 2 zeigt Ergebnisse von MEREDITH und PATRICK (7) über die Abhängigkeit der Wurzelmenge vom Trockenraumgewicht bei drei mittelschweren Böden.

Wie aus den Ergebnissen ersichtlich ist, fällt die Wurzelmenge auf den drei Böden mit zunehmender Bodendichte mit einer schwachen Neigung linear ab und ein Optimalbereich ist nicht deutlich sichtbar. Allerdings zeigen die Ergebnisse für den tonigen Lehm und Schlufflehm, daß bei Trockenraumgewichten kleiner als 1,40 p/cm<sup>3</sup> die Anordnung der Punkte zur Waagerechten tendiert.

Trotzdem ist aus der Darstellung ersichtlich, daß die Wurzel für ihr Wachstum lockeren Boden bevorzugen. Dieses Wachstum kann jedoch luxurierend sein und braucht nicht unbedingt zu einer höheren Ertragsleistung der Pflanzen zu führen.

Deshalb ist die Wurzelentwicklung zwar als ein relativ sicherer Indikator für die Bodendichte anzu-



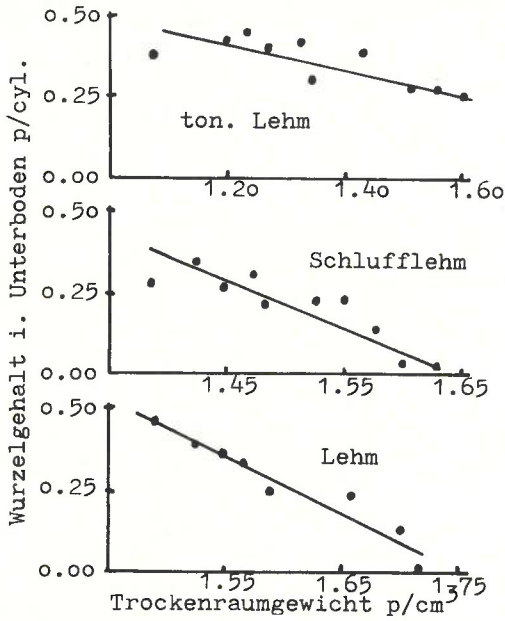


Abb. 2: Beziehung zwischen Trockenraumgewicht und Wurzelgehalt (nach MEREDITH und PATRICK)

sehen, jedoch nicht unbedingt auch für die Ertragsleistung.

Allerdings sind noch Zweifel an der Straffheit der degressiven, linearen Beziehung zwischen Bodendichte und Wurzelwachstum angebracht.

Ergebnisse von TACKETT und PEARSON (8) in Abbildung 3 zeigen, daß der Abfall der Wurzelmasse erst im Bereich von 1,40 p/cm<sup>3</sup> Trockenraumgewicht beginnt, und sich also ebenfalls ein Optimalbereich abzeichnet wie bei der Ertragsleistung.

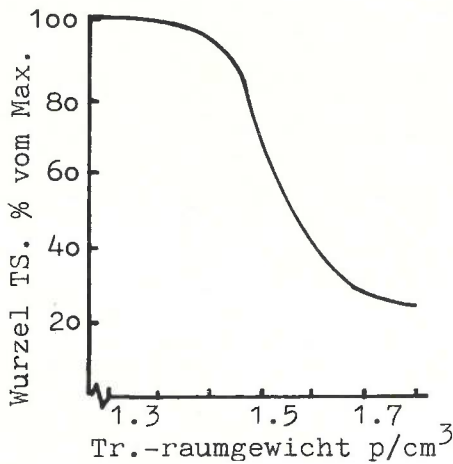


Abb. 3: Trockenraumgewicht im Untergrund und Wurzelgehalt bei Baumwolle, Durchschnitt O<sub>2</sub>-Stufen (nach TACKETT und PEARSON)

**Ansprüche an den Gasaustausch**

Die Bodendichte ist zwar eine universelle und relativ leicht zu bestimmende Maßzahl. Sie ermöglicht jedoch keine Aussage über den Porengehalt und die Porenverteilung, insbesondere über die Luftkapazität des Bodens, die für den Gasaustausch des Bodens entscheidend ist und deshalb als einer der wichtigsten bodenphysikalischen Parameter angesehen werden muß.

Wie die Tabellen 1 und 2 ergeben, liegt das Optimum der Luftkapazität für das Pflanzenwachstum bei etwa 8—12 Vol. % Porenvolumen. Aber auch bei der Luftkapazität zeigt sich, wie aus der Abbildung 4 ersichtlich, daß das Wurzelwachstum auch noch auf höhere Werte positiv anspricht, also noch dort, wo bereits mit Schwierigkeiten beim „Bodenschluß“ zu rechnen ist (Tab. 1). Es liegt nahe die Ursache für diese positive Reaktion der Wurzeln in der Funktion der Luftkapazität beim Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre zu suchen.

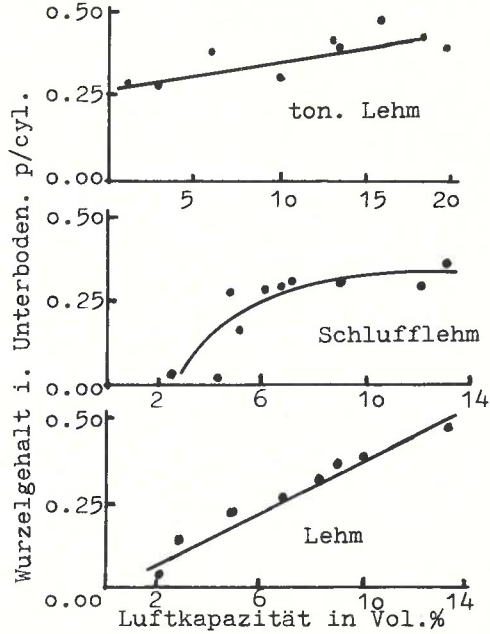


Abb. 4: Beziehung zwischen Luftkapazität und Wurzelgehalt im Unterboden (nach MEREDITH und PATRICK)

Abgesehen von grobkrümeligen Oberflächen, in denen Gasaustausch auch durch Konvektion möglich ist, erfolgt dieser im wesentlichen durch Gasdiffusion. Deshalb scheint es sinnvoll, zur Sicherung dieses Vorganges die Luftkapazität größer als erforderlich zu machen, zumal die Gasdiffusion im wesentlichen mit dem Gehalt an Makroporen ansteigt (9).

Jedoch liegen auch Untersuchungen darüber vor, daß zur Sicherung des Gasaustausches für die Wurzelatmung der Pflanzen nur ein relativ geringer Teil der Luftkapazität von insgesamt 8—12 Vol. % erforderlich ist (10).

Denn für ein ungehindertes Wurzelwachstum ist eine Sauerstoffnachlieferung von 2,8—5,6 l O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> und Tag erforderlich, eine Menge, die etwa ein Drittel der vom Boden insgesamt verbrauchten Sauerstoffmenge beträgt.

Zwei Drittel des Sauerstoffverbrauchs des Bodens und damit auch des erforderlichen Diffusionsquerschnittes werden für den Gasaustausch bei der Bodenatmung, und damit für die Humuszersetzung in Anspruch genommen.

Wenn wir also bisher geglaubt haben, daß zur Verbesserung der Sauerstoffversorgung der Wurzeln eine relativ starke Bodenlockerung erforderlich sei, so ist dies sicher nicht ganz richtig (11).

Denn der größte Teil dieser besseren Sauerstoffversorgung wird nicht von den Pflanzenwurzeln in Anspruch genommen, sondern dient zur Anheizung

der Zersetzungsprozesse im Boden. Berechnungen des erforderlichen Diffusionsquerschnittes lassen erkennen, daß eine Luftkapazität von etwa 3 Vol. % bereits genügen müßte, um die Kohlensäureproduktion sowohl der Pflanzenwurzeln als auch der Mikroorganismen vor Erreichen schädlicher Konzentrationen aus dem Boden zu entfernen (10).

Der Optimalwert der Luftkapazität von etwa 10 Vol. % kann also nicht alleine aus den Ansprüchen von Boden und Pflanzen an den Gasaustausch erklärt werden.

Viele Autoren (12, 13 u. a.) sind deshalb der Ansicht, daß die Wirkung einer zunehmenden Bodendichte auf Wurzelwachstum und Ertrag stärker auf die parallellaufende Zunahme des mechanischen Bodenwiderstandes, d. h. auf die schlechtere Zugänglichkeit des Bodens für die Pflanzenwurzel, zurückzuführen ist, als auf die gleichzeitig stattfindende Beeinträchtigung des Gasaustausches.

Als Beispiel für die stärkere Dominanz der Bodendichte gegenüber der Sauerstoffversorgung beim Rückgang des Wurzelwachstums sind in Ab-

bildung 5 Ergebnisse von TACKETT und PEARSON (8) dargestellt. Sie zeigen, daß bei Bodendichten über 1,50 p/cm<sup>3</sup> Trockenraumgewicht die Zunahme des Sauerstoffgehaltes nur noch einen geringen Einfluß auf die Wurzeleindringung in den Boden hat. Auch hinsichtlich der Kohlensäure ergab sich nach den gleichen Autoren (14), wie Abbildung 6 zeigt, eine stärkere Dominanz der Bodendichte auf das Wurzelwachstum als des CO<sub>2</sub>-Gehaltes.

**Ansprüche an den mechanischen Bodenwiderstand**

Die Arbeiten über den Einfluß von mechanischen Widerständen auf das Wurzelwachstum reichen sehr weit zurück und bereits PFEFFER versuchte den Bodenwiderstand mit Sonden zu messen, die Wurzelspitzen nachgebildet waren (15).

Als ein Beispiel von Untersuchungen aus jüngerer Zeit sind in Abbildung 7 Ergebnisse von TAYLOR und RATLIFF (16) über den Zusammenhang von Bodenwiderstand und Wurzelwachstum dargestellt. Wie hieraus ersichtlich, ergibt sich ein steiler Abfall des Wurzellängenwachstums bei Zunahme des Bodenwiderstandes. Da Wassergehalt und Bodenwiderstand negativ miteinander korreliert sind (6), muß neben der Bodendichte auch die Bodenfeuchte — abgesehen von ihren physiologischen Wirkungen auf das Wurzelwachstum — als eine, wenn auch indirekte, mechanische Einflußgröße in Rechnung gestellt werden.

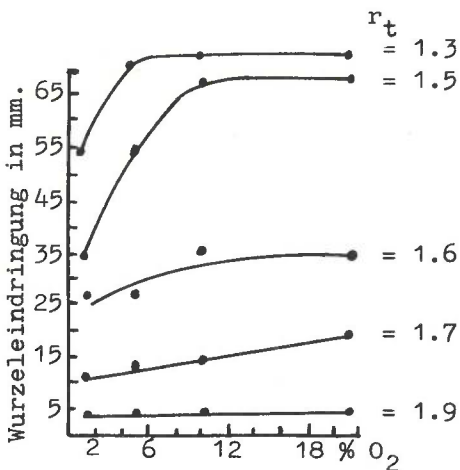


Abb. 5: O<sub>2</sub>-Gehalt, Raumgewicht im Untergrund und Wurzeleindringung (nach TACKETT und PEARSON)

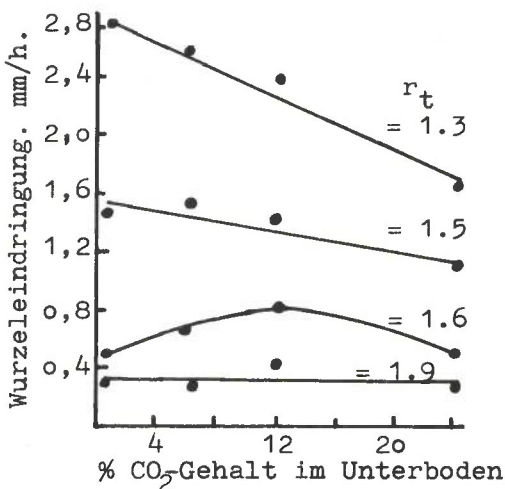


Abb. 6: Wirkung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes auf die Wurzeleindringung bei verschiedenen Trockenraumgewichten [r<sub>t</sub>] (nach TACKETT und PEARSON)

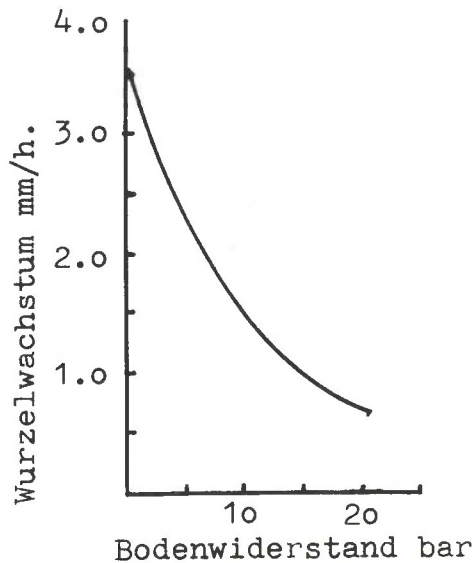


Abb. 7: Beziehung zwischen Wurzelwachstum und Bodenwiderstand bei Baumwolle (nach TAYLOR u. a.)

Eigene Untersuchungen in Unterdrucklysimetern über den Einfluß von Bodenart, Bodenkrümelung und Bodenwasserspannung auf den Aufgang und das Jugendwachstum von Zuckerrüben bestätigen die Auswirkungen auch relativ geringer Änderungen der Bodenfeuchte auf die Wurzelbildung.

Das Ergebnis 4jähriger Versuche mit Sand-, Lehm- und Tonboden ist in Tabelle 4 zusammengefaßt. Wie die Tabelle zeigt, steht der Rübenaufgang, insbesondere bei der feinen Krümelung (fn),



Tabelle 4: **Einfluß von Bodenart, Bodenkrümelung und Saugspannung auf den Aufgang und das Frischgewicht von Zuckerrüben in Unterdrucklysimetern**

Boden	Saugspannung cm Ws			50			150			300		
	Krümel Durchmesser cm	Vol. %		Rel. Aufgang			Rel. Frischgewicht					
		PV	LG 50 cm Ws									
Sand	< 2 fn <sup>1)</sup>	39,0	17,8	100	117	110	100	93	73			
	2—6 mi <sup>2)</sup>	40,2	17,9	100	110	126	100	87	95			
	> 6 gr <sup>3)</sup>	39,7	17,9	100	93	93	100	85	82			
Lehm	< 2 fn	47,4	14,5	100	106	126	100	124	91			
	2—6 mi	49,1	17,5	100	92	95	100	148	130			
	> 6 gr	48,0	14,8	100	99	93	100	102	102			

<sup>1)</sup> fn = fein; <sup>2)</sup> mi = mittel; <sup>3)</sup> gr = grob.

in einem direkten Zusammenhang zur Saugspannung, d. h. er ist bei geringerer Bodenfeuchte besser als bei höherer Bodenfeuchte. Bei der groben Krümelung dagegen ist der Rübenaufgang bei niedriger Saugspannung, d. h. bei höherer Bodenfeuchte besser.

Sand- und Lehmboden zeigen ungefähr dasselbe Ergebnis, nur ist beim Lehm bereits bei der mittleren Krümelung der Zusammenhang zwischen Bodenfeuchte und Aufgang positiv. Beim Frischgewicht dagegen differenzieren sich die Ergebnisse auf beiden Bodenarten wesentlich stärker voneinander.

Beim Sandboden fällt bei allen Krümelgrößen das Frischgewicht mit Zunahme der Bodenwasserspannung, d. h. mit abnehmender Bodenfeuchte ab, besonders stark bei der feinen Krümelung.

Beim Lehmboden dagegen liegt das höchste Frischgewicht für die mittlere und feine Krümelung bei 150 cm Ws, also etwas unterhalb der Bodenfeuchte bei Feldkapazität (18).

Die niedrigere Saugspannung (50 cm Ws) — entsprechend einer höheren Bodenfeuchte — wie auch die höhere Saugspannung (300 cm Ws) haben — mit Ausnahme der groben Krümelung — niedrigere Rübenfrischgewichte.

Es liegt insbesondere beim Sandboden nahe, als Ursache für den Abfall des Rübenfrischgewichtes mit zunehmender Saugspannung eine schlechtere Wasserversorgung der Rübenpflanzen als Folge einer schwereren Verfügbarkeit des Bodenwassers anzunehmen.

Die abschließende Untersuchung der Wurzelbildung hat jedoch gezeigt, daß vor allem beim Sandboden die Rübenwurzeln mit Zunahme der Bodenwasserspannung zu kümmerlichem Wachstum und Beinigkeit neigten, und insbesondere bei der feinen Krümelung und 300 cm Ws Bodenwasserspannung oft nur wenig in den Boden eingedrungen sind (Abb. 8). Dies ist ein Zeichen dafür, daß selbst in diesem relativ hohen Feuchtebereich die abnehmende Bodenfeuchte den Bodenwiderstand soweit erhöht hat, daß er sich nachteilig auf das Wurzelwachstum ausgewirkt hat.

Auch beim Lehmboden ergab sich ein Einfluß von Krümelung und Bodenwasserspannung auf die Rübenformen (Abb. 9).

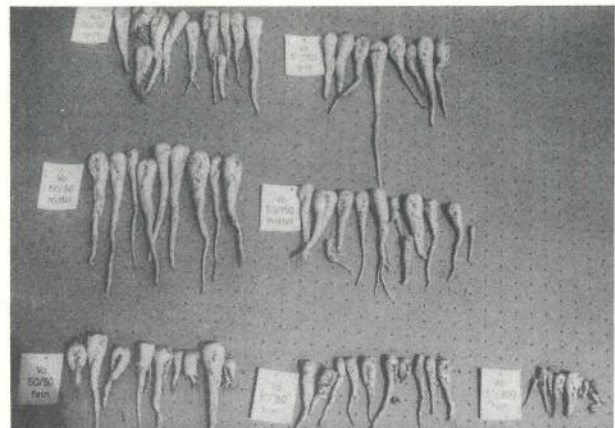


Abb. 8: Rübenformen in Unterdrucklysimetern auf Sandboden  
 oben: grobe Krümelung  
 waagerecht Mitte: mittlere Krümelung  
 unten: feine Krümelung  
 links: 50 cm Ws Saugspannung  
 senkrecht Mitte: 150 cm Ws Saugspannung  
 rechts: 300 cm Ws Saugspannung



Abb. 9: Rübenformen in Unterdrucklysimetern auf Lehmboden  
 oben: grobe Krümelung  
 waagerecht Mitte: mittlere Krümelung  
 unten: feine Krümelung  
 links: 50 cm Ws Saugspannung  
 senkrecht Mitte: 150 cm Ws Saugspannung  
 unten: 300 cm Ws Saugspannung

Die besten Rübenformen waren in den meisten Jahren bei der mittleren Krümelung und der Bodenwasserspannung von 150 cm Ws vorhanden. Da-

bei ergab sich, daß die grobe Krümelung im allgemeinen die nachteiligen Wirkungen der hohen wie auch der niedrigen Bodenfeuchte kompensiert. Doch zeigte sich, daß auch auf diesem Boden bei 300 cm Ws die schlechtesten Rübenformen ausgebildet wurden.

Eine Sonderstellung nahm die Ausbildung der Rübenformen auf Tonboden ein. Da sich infolge der schlechten kapillaren Leitfähigkeit die Saugspannung am Lysimeter nicht auf die Bodenfeuchte im Lysimeter auswirken konnte, war zwischen den Gefäßen eine Differenzierung der Bodenfeuchte nicht vorhanden, so daß sich der Boden auf allen Behandlungen im feuchtplastischen Zustand befand. Jedoch waren die Unterschiede in der Krümelung vorhanden. Trotzdem wiesen die Rüben bei allen Gefäßen einheitlich schlanke und glatte Körper ohne jede Beinigkeit auf (Abb. 10).

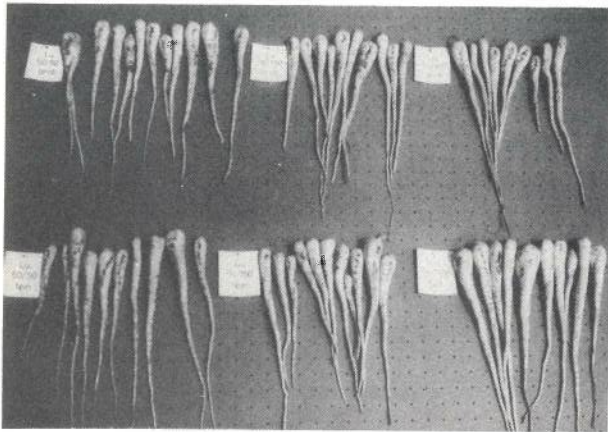


Abb. 10: Rübenformen in Unterdrucklysimetern auf Tonboden  
 waagrecht oben: grobe Krümelung  
 senkrecht unten: feine Krümelung  
 links: 50 cm Ws Saugspannung  
 Mitte: 150 cm Ws Saugspannung  
 rechts: 300 cm Ws Saugspannung

Das leichte Eindringen der Wurzeln in den Boden ist jedoch für die Pflanzen auch in späteren Wachstumsstadien, insbesondere in Dürrezeiten, von entscheidender Bedeutung.

Denn mit zunehmender Austrocknung des Bodens sinkt die kapillare Wasserleitfähigkeit stark ab, so daß die Wasserversorgung der Pflanzen nicht durch eine Wasserbewegung zur Wurzel, sondern durch vermehrtes Wachstum der Wurzeln zu den Bodenwasservorräten, sichergestellt werden muß.

Hierfür ist ein möglichst geringer Bodenwiderstand vorteilhaft, der in einem lockeren Boden eher vorhanden ist als in einem dichten.

Das Ansprechen des Wurzelwachstums auf die Bodenlockerheit bei absinkendem Bodenfeuchtevorrat konnte an 2 Tiefpflugversuchen auf Parabraunerden aus Löß festgestellt werden (19).

Wie Abbildung 11 zeigt, entnahmen die Zuckerrüben in einem Trockenjahr die Wasservorräte des Unterbodens auf der Tiefpflugparzelle wesentlich stärker als auf der Normal-Pflugparzelle. Dies zeigte sich selbst bei einem hohen Gesamtporenvolumen auf der Normalparzelle.

In der Verminderung des Bodenwiderstandes bei austrocknenden Böden haben wir einen der wesentlichsten Effekte der mechanischen Lockerung, insbesondere der Pflugarbeit, zu sehen. Der nachgewie-

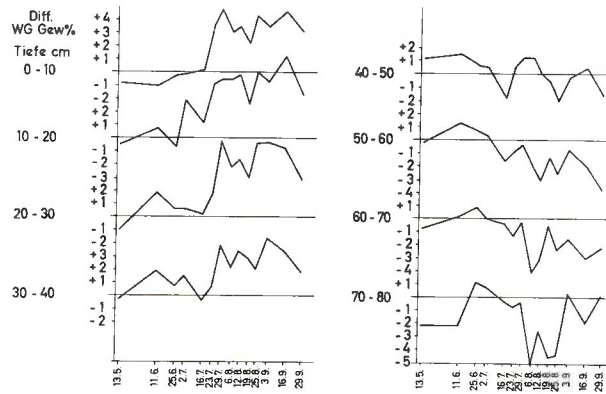


Abb. 11: Wasserentnahme durch Zuckerrüben (1969) auf Tiefpflugversuch (Halchter), Differenzen des Wassergehaltes in Gew<sup>0</sup>/0, tief-normal gepflügt

sene günstige Einfluß einer Vertiefung der Pflugarbeit auf das Pflanzenwachstum ist damit u. a. auch als Wirkung gegen eine defizitäre Wasserversorgung des Pflanzenstandortes zu erklären. Da dieser Einfluß jedoch seine Grenze bei den erschließbaren Wasservorräten des Unterbodens findet, die durch Bodenlockerung nicht immer erhöht werden, kann er unter Umständen die Ursache von Ertragsminderungen im Gefolge einer solchen Maßnahme sein, nämlich dann, wenn die Lockerung den Pflanzen in einem frühen Wachstumsstadium einen Luxuskonsums von Wasser ermöglicht, das dann für spätere Wachstumsstadien nicht mehr zur Verfügung steht.

### Die Überlockerung — ein wichtiges Problem der Bodenbearbeitung

Die Abgrenzung von minimalen und maximalen Ansprüchen der Pflanzen an die Pflugtiefe ist nicht zuletzt an Hand der vorhin erwähnten Zusammenhänge möglich. Eine grobe Auswertung der sehr umfangreichen Literatur ergibt als minimalen Anspruch der Pflanzen an die Pflugtiefe etwa 12 bis 16 cm, als durchschnittlichen etwa 20—30 cm und als maximalen Anspruch etwa 35—40 cm Pflugtiefe.

Als vorteilhaft hat sich immer wieder der Wechsel der Pflugtiefe erwiesen — eine Variationsmöglichkeit, die jetzt mit Hilfe von leistungsstarken Schleppern verwirklicht werden kann. Man muß aber auch auf die Grenzen der Bodenlockerung durch den Pflug hinweisen.

Im Rübenbau zeigen sowohl Erfahrung als auch Versuchsergebnisse, daß eine tiefe Lockerung nicht immer Mehrerträge zur Folge hat, dafür jedoch mit Sicherheit einen höheren Anteil an geraden, schlanken Rüben bringt. Denn die Rübenform spricht, wie aus Modell- und Fräsversuchen bekannt ist, auf eine gute Bodenkrümelung stets positiv an (20). Eine gute Krümelung wirkt sich jedoch infolge der damit verbundenen großen Lockerheit vielfach ungünstig auf den Aufgang der Rüben aus und vermindert die Stabilität des Bodens gegen Verschlammung.

Aber obwohl viele Untersuchungen über die Zusammensetzung des Krümelgemisches nach der Pflugarbeit vorliegen, ist noch relativ wenig über die Auswirkung verschiedener Krümelgemische auf das Pflanzenwachstum bekannt.



Wie die Untersuchungen über das optimale Porenproblem zeigen, sind die Pflanzen sowohl gegen eine zu starke Bodenverdichtung als auch gegen eine zu starke Bodenlockerung empfindlich.

Für Zuckerrüben konnte an Hand der Körperausbildung auch eine Empfindlichkeit gegen schollige Krümelung nachgewiesen werden (21).

Es ist daher anzunehmen, daß Überlockerung und Scholligkeit sich in ihren negativen Wirkungen auf das Pflanzenwachstum verstärken und hierin die Forderung nach einem guten Bodenschluß ihre Begründung findet.

Daß die nachteiligen Wirkungen einer Überlockerung durch eine gute Krümelung zum Teil kompensiert werden können, ist aus mehrjährigen eigenen Untersuchungen über den Einfluß einer Fräsarbeit bei der Frühjahrspflanzung auf Ertrag und Beinigkeit von Zuckerrüben zu schließen. Im Vergleich stand eine Winterfurche zu einer Winterfurche, die vor der Rübenbestellung auf 15 cm Tiefe gefräst worden ist.

Tabelle 5: Einfluß von Pflug- und Fräsarbeit auf bodenphysikalische Parameter und Rübenwachstum auf Lehm-(Löß-)boden (1965—1971)

Bearbeitung	PV Vol. %	LG <sup>1)</sup>	Trocken- raum- gewicht p/cm <sup>3</sup>	beinig %	Ertrag Rel.
Winterfurche	46,6	13,5	1,42	55	100
Winterfurche + Fräse i. Fjh.	51,0	18,1	1,30	42	106

<sup>1)</sup> Bei 100 cm Ws. Saugspannung.

Die Ergebnisse des 6jährigen Versuchs auf einer Parabraunerde aus Löß sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Wie sich aus den Zahlen ergibt, lag das Porenvolumen auf der Winterfurche plus Fräsarbeit im Durchschnitt bei 51 Vol. % und der Luftgehalt bei 100 cm Ws bei 18 Vol. % — damit also bei Werten, die nach Tabelle 1 über dem Optimalbereich liegen. Die Winterfurche lag mit rund 47 Vol. % PV und 14 Vol. % Luftgehalt nahe an der oberen Grenze dieses Bereiches. Wie die Ergebnisse zeigen, wurde durch die Fräsarbeit trotz des hohen Porenvolumens die Beinigkeit deutlich vermindert und der Ertrag im Durchschnitt von 6 Jahren um 6 % erhöht.

Eigene Untersuchungen des Wurzelbildes an ungleich stehenden Rüben auf hochbonitierten Parabraunerden und Feuchtschwarzerden ergaben als Ursache des schlechten Wachstums zu große Scholligkeit, die einen guten Kontakt der Rübenwurzeln zum Boden verhinderte.

Auf mangelhaften Bodenkontakt scheinen Rübenwurzeln besonders stark anzusprechen. Allerdings konnte diese Empfindlichkeit nur bei Lehmböden, nicht aber bei Tonböden beobachtet werden, auf denen die Rüben, wie Abbildung 10 gezeigt hat, trotz grober Krümelung schlanke und glatte Körper ausbilden, sofern der Bodenzustand feuchtplastisch ist und den Wurzeln keinen wesentlichen mechanischen Widerstand bietet.

Im allgemeinen muß aber bei einer Überlockerung, d. h. bei schlechtem „Bodenschluß“ in den meisten Fällen mit negativen Reaktionen der Pflanzen wie auch des Bodens gerechnet werden.

Deshalb ist es zweifellos ein unbefriedigender Zustand, daß die Bodenbearbeitung noch nicht in der Lage ist, sei es durch Bodenlockerung oder künstliche Bodensetzung, optimale bodenphysikalische Verhältnisse mit wirtschaftlich tragbaren Kosten zu schaffen.

Die mechanische Bodenlockerung ist jedoch nicht der einzige Weg, auf dem Makroporen im Boden geschaffen werden. Weitere für das Wurzelwachstum geeignete Makroporen bei sonst dichtem Boden bestehen aus: Wurzelkanälen, Wurmröhren sowie aus den Spalten durch die Wirkung von Frost und Trockenheit.

Gegenüber den Makroporen der mechanischen Bodenlockerung sind diese Porenformen mit Sicherheit in der Minderzahl. Dafür haben sie den Vorteil, daß sie vertikal orientiert und deshalb sicherlich dem Wurzelwachstum besser angepaßt sind, als die zufällig orientierten, mechanisch gebildeten Poren.

Diese vertikale Orientierung verleiht den natürlichen Makroporen einen höheren Wirkungsgrad beim Ablauf der physikalischen Funktionen des Bodens.

Dieser Tatbestand wird zwar immer wieder bestritten, jedoch schon von SCHULTZ-LUPITZ (22) beschrieben und in letzter Zeit von KÖHNLEIN (23) bestätigt.

Die praktische Auswertung dieser Erkenntnis führte schon frühzeitig zur eingeschränkten Bodenlockerung, wie sie neuerdings heute in Form der Minimal-Bodenbearbeitung oder der Direktsaat vorgeschlagen wird.

Es hat sich jedoch gezeigt, daß — früher wie heute — eine länger andauernde Durchführung beider Verfahren auf Schwierigkeiten der verschiedensten Art stößt (24, 25).

Dies liegt nicht zuletzt an den Folgen der Bodenbewirtschaftung, die durch Fahrverdichtungen sowie durch Verhinderung einer längeren Bodenruhe die Bildung und Erhaltung des natürlichen Hohlraumgefüges unter einem Schwellenwert hält, dessen Überschreitung für einen längerfristigen Ersatz der mechanischen Bodenlockerung erforderlich ist.

### Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen zahlreicher Autoren ergibt sich, daß für das Pflanzenwachstum optimale Bereiche von Bodendichte und Bodenporosität bestehen, die verhältnismäßig unabhängig von den äußeren Wachstumsbedingungen sind.

Die negativen Einflüsse einer zu großen Bodendichte auf das Pflanzenwachstum sind weniger auf die toxischen Folgen eines ungenügenden Gasaustausches zurückzuführen, vielmehr ist als begrenzender Faktor der mechanische Bodenwiderstand anzusehen, der über die Behinderung des Wurzelwachstums zu einer Störung der Pflanzenentwicklung führt.

Ein weiterer Störfaktor des Wurzelwachstums und damit auch der Pflanzenentwicklung ist die „Überlockerung“ des Bodens durch die mechanische Bodenbearbeitung. Sie beginnt sich zu einem der wichtigsten Probleme der modernen Bodenbearbeitung zu entwickeln.

## Summary

### The requirements of plants to soil physical conditions

The investigations of numerous authors on the influence of physical soil conditions on plant growth are showing the existence of optimum ranges for soil density and soil porosity which are relatively independent to external growth conditions.

Negative results of a too great soil density are not so much caused by toxic effects of an insufficient gaseous exchange on plant growth. The main reason seems to be soil mechanical resistance which by impedance of root growth is unfavourable to plant growth.

Another factor impeding root and plant growth is the "excess loosening" of the soil by soil tillage. This factor is becoming a most important problem in modern soil tillage.

### Literatur

- (1) CZERATZKI, W.: Möglichkeiten und Aussichten für den Ersatz der mechanischen Bodenbearbeitung durch chemische Wirkstoffe. — *Landbauforsch. Völknerode Sonderheft 1* (1969), S. 11—20.
- (2) FRESE, H.: Aktuelle Probleme der Bodenbearbeitung. — *Archiv der DLG 44* (1969), S. 53—73.
- (3) STRANAK, A.: Bodenbearbeitung im Hinblick auf eine optimale Lagerungsdichte der Ackerböden. — *Tagungsber. DAL Berlin 82* (1966), S. 193—205.
- (4) ERMICH, D.: Untersuchungen über den Einfluß der Bodendichte auf Pflanzenwachstum und Ertrag. — *Problems of Soil Cultivation, Proc. Int. Scient. Symp. Brno* (1968), S. 69—75.
- (5) TIMM, H.; FLOCKER, W. J.: Response of potato plants to fertilization and soil moisture tension under induced soil compaction. — *Agron. Journ.* **58** (1966), S. 153—157.
- (6) CZERATZKI, W.: Die Charakterisierung von bearbeitungsbeeinflussten Bodeneigenschaften in Beziehung zum Pflanzenwachstum. — *Landbauforsch. Völknerode 16* (1966), S. 37—44.
- (7) MEREDITH, H. L.; PATRICK, W. H.: Effects of soil compaction on subsoil root penetration and physical properties of three soils in Louisiana. — *Agron. Journ.* **53** (1961), S. 163—167.
- (8) TACKETT, J. L.; PEARSON, R. W.: Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil cores. — *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **28** (1964), S. 600—605.
- (9) WESSELING, J.; van WIJK, W. R. Optimal depth of drainage. — *Neth. Journ. of Agric. Sci.* **3** (1955), S. 106—119.
- (10) VAN DUIN, R. H. A.: On the influence of tillage on conduction of heat, diffusion of air and infiltration of water. — *Dissertation Wageningen*, 1956.
- (11) BROWN, N. J.; FOUNTAINE, E. R.; HOLDEN, M. R.: The oxygen requirement of crop roots and soils under near field conditions. — *Journ. Agric. Sci.* **64** (1965), S. 195—203. Zit. n. KUIPERS, H.: Die Ansprüche der Kulturpflanzen an die physikalischen Bodeneigenschaften aus der Sicht des Pflanzenbauers. — *Vortr. Schweizer. Verb.-Ing. Agron.* 1968.
- (12) TAYLOR, H. M.; BURNETT, E.: Influence of soil strength on the root growth habit of plants. — *Soil Sci.* **98** (1964), S. 174—180.
- (13) PHILLIPS, R. E.; DON KIRKHAM: Mechanical impedance and corn seedling root growth. — *Proc. Soil Soc. Amer.* **26** (1962), S. 319—322.
- (14) TACKETT, J. L.; PEARSON, R. W.: Effects of carbon dioxide on cotton seedling root penetration of compacted soil cores. — *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **28** (1964), S. 741—743.
- (15) PFEFFER, W.: Druck und Arbeitsleistung durch wachsende Pflanzen. — *Abhandlg. d. sächs. Ges. d. Wiss. XX* (1893), S. 235—274.
- (16) TAYLOR, H. M.; RATLIFF, L. F.: Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. — *Soil Sci.* **108** (1969), S. 113—119.
- (17) CZERATZKI, W.: Die Bewegungen des Bodenwassers in Unterdrucklysimetern unter dem Einfluß von Verdunstung und Frostwirkung beim verschiedenem Bodenzustand. — *Landbauforsch. Völknerode 16* (1966), S. 143—154.
- (18) CZERATZKI, W.: Untersuchung über die Bodenfeuchte und die Bodenwasserspannung im Bereich der Feldkapazität bei Sand- und Lehmböden. — *Landbauforsch. Völknerode 20* (1970), S. 117—124.
- (19) CZERATZKI, W.; SCHULZE, F.: Der Einfluß des Tiefpflügens auf die Wasserentnahme der Pflanzen aus verschiedenen Tiefen bei Lößparabraunerden. — *Landw. Forschung Sonderheft 26/I.* (1971), S. 73—83.
- (20) FRESE, H.; CZERATZKI, W.; ALTEMÜLLER, H.-J.: Über die Wirkung der Verteilung organischer und anorganischer Düngestoffe im Boden auf das Wurzelwachstum von Zuckerrüben. — *Z. Pflanzenern., Düng., Bodenkd.* **69** (1955), S. 198—205.
- (21) SEKERA, F.; BRUNNER, A.: Beiträge zur Methodik der Gareforschung. — *Z. Bodenkd. u. Pflanzenern.* **29** (1943), S. 169.
- (22) SCHULTZ-LUPITZ: Über die Bewurzelung der landwirtschaftlichen Kulturgewächse und deren Bedeutung für den praktischen Ackerbau. — *Jahrbuch der DLG Bd. 6* (1891), S. 81—90.
- (23) KÖHNLEIN, J.: Die Bedeutung der Unterbodenporung. *Landw. Forschung*, 14. Sonderheft (1960), S. 61—71.
- (24) CZERATZKI, W.; RUHM, E.: Ergebnisse aus Versuchen mit bearbeitungsloser Bestellung. — *Landw. Forschung 26/I. Sonderheft* (1971), S. 281—289.
- (24) AID: Minimalbodenbearbeitung. — *AID-Heft 330*, Bod Godesberg, 1971.

*Verfasser: Czeratzki, Walter, Dr. rer. nat., wiss. Mitarbeiter im Institut für Pflanzenbau und Saatgutforschung der Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völknerode (Direktor: Prof. Dr. agr. Dieter Bommer).*