

Landtech

Bodenbearbeitung: Energie-Input und Saatbettstruktur

Ernst Spiess, Thomas Anken und Jakob Heusser, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), CH-8356 Tänikon

Peter Weisskopf, Christoph Högger und Hans-Rudolf Oberholzer, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), CH-8046 Zürich

Auskünfte: Ernst Spiess, e-mail: ernst.spieess@fat.admin.ch, Fax: +41 (0)52 365 11 90, Tel. +41 (0)52 368 31 31

Verschiedene Bearbeitungssysteme zeigen bei Böden mit hohem Bearbeitungswiderstand relativ grosse Unterschiede hinsichtlich Bearbeitungseffekt, Energiebedarf und -effizienz. Aktive Systeme (zapfwellengetriebene Werkzeuge) sind den passiven diesbezüglich überlegen. Dies trifft vor allem für das System des Zinkenrotors zu. Eine übermässige Steigerung der Bearbeitungsintensität erwies sich als ineffizient. Der Energie-Input liegt in der gleichen Grössenordnung wie bei der Handhacke. Im Vergleich zu den natürlichen Energieflüssen, welche die Bodenstruktur in weit höherem Ausmass beeinflussen können, erscheint die applizierte Bearbeitungsenergie auch bei hoher Intensität als relativ gering.

Dank hochentwickelter Gerätetechnik und der Verfügbarkeit ausreichender Zug- und Antriebsleistungen kann heute der Bearbeitungsgrad des Bodens in einem breiten Spektrum variiert

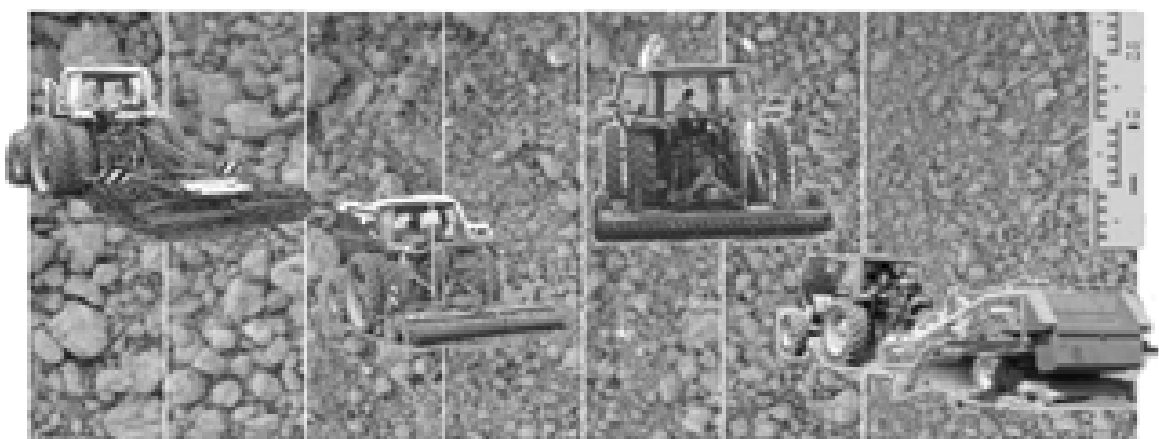
werden. Bekanntlich ist aber nicht alles, was das Pflanzenwachstum fördert, dem Boden längerfristig zuträglich. Wie stark kann die Bearbeitung intensiviert werden, bis Folgewirkungen - auch kurzfristig - nachweisbar sind? Als wesentliche Einflussfaktoren fallen hier Bodenart und Bodenzustand (Gefüge, Feuchtigkeit), Bearbeitungssystem sowie Folgewitterung und Folgekultur in Betracht. Für eine Quantifizierung der kurzfristigen Auswirkungen unterschiedlicher Bodenbearbeitung wurde in zwei einjährigen Feldversuchen zunächst vor allem der Energie-Input bei der Bearbeitung, die Bearbeitungsintensität und Saatbettstruktur unter-

sucht. Im Beitrag auf Seite 354 «Folgewirkung von Bodenbearbeitungsmassnahmen» (Spiess *et al.* 2000) werden die Auswirkungen auf die Veränderungen des Bodengefüges, die Nitrifikation beziehungsweise Nitratbildung, die biologische Aktivität sowie die Regenwurmpopulationen und die Ertragsbeeinflussung behandelt.

Passive und aktive Bodenbearbeitungssysteme

Ausgangslage bildete das gepflügte Feld. Neben der **Federzinkenegge** als Standardgerät, die nur Zugenergie benötigt, wurden als zapfwellengetriebene Geräte sowohl der **Zinkenrotor** als auch die **Kreisellegge** mit-

Abb. 1. Passive und aktive Bodenbearbeitungssysteme.

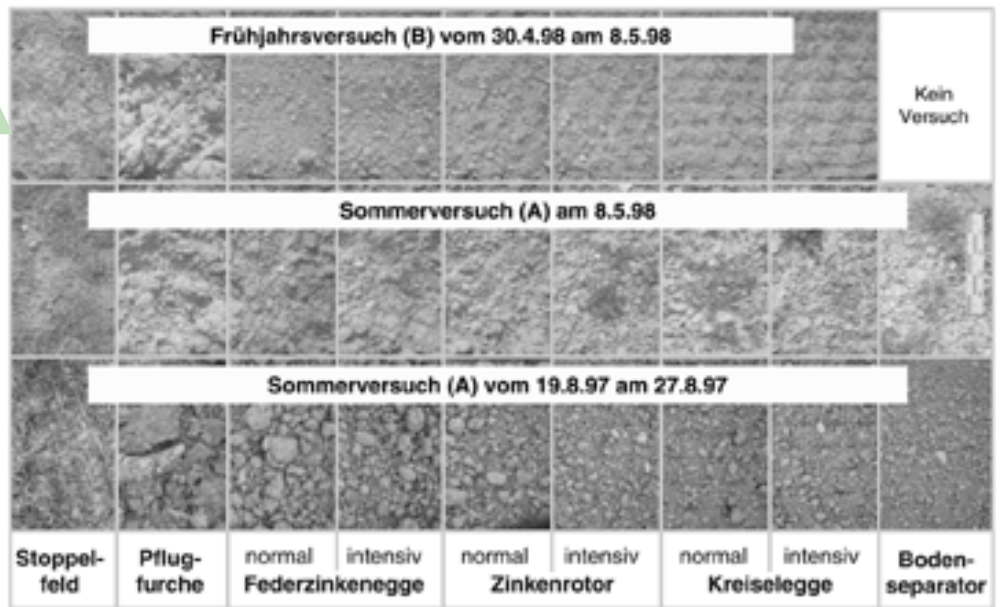


Intensität	normal	intensiv	normal	intensiv	normal	intensiv	normal
Gerät	Federzinkenegge Rau (Strichabstand 10 cm)		Zinkenrotor Rau RDL 30		Kreisellegge Rabe MKE 300		Bodenseparator Flekkie
Arbeitsgänge	2	3	1	1	1	1	1
Arbeitsbreite	2,8		3,0		3,0		1,51 m
Praktische Arbeitstiefe	8,5/8,5		10,4	11,0	10,3	10,9	15,9 cm
Umfangsgeschwindigkeit	-	-	4,9	18,3	2,4	10,2 m/s	-
Arbeitsgeschwindigkeit	8,3/8,9		4,3	1,8	4,2	1,8	0,7 km/h

einbezogen (Abb. 1). Im ersten Versuch (A) kam auch ein **Bodenseparator mit Siebband** und 30 mm Siebbandlichtweite zum Einsatz (Abb. 1). Der Grund für den Miteinbezug dieses Gerätes lag bei geäusserten Befürchtungen, dass der Boden bei diesem System durch das Absieben überbeansprucht und geschädigt werden könnte.

Die **Bodenseparierung** wird in der Schweiz im Kartoffel- und Gemüsebau aus qualitativen und arbeitswirtschaftlichen Gründen eingesetzt, um Beimengungen (Steine und Erdschollen) von der Grösse der angebauten Wurzelfrüchte vor der Saat beziehungsweise dem Legen oder Pflanzen aus dem Erntebereich der Pflanze auszuscheiden (Spiess *et al.* 1992). Die Grösse der abgetrennten («separierten») Teile hängt von der Siebbandlichtweite ab und entsprach im Versuch mit 30 mm den Bedürfnissen im Speisekartoffelanbau. Um vergleichbare Ausgangsbedingungen zu schaffen, wurde der Bodenseparator wie die anderen Geräte direkt im gepflügten Feld und nicht wie im Kartoffelbau üblich, nach dem Vorziehen von tiefen Furchen eingesetzt. Die Ablage der abgesiebten Beimengungen erfolgte ausserhalb der bearbeiteten Parzellen.

Mit Ausnahme des Bodenseparators, wo die Bearbeitungsintensität des Bodens ohne Austausch des Siebbandes kaum variiert werden kann, wurden die Geräte im Versuch mit **zwei Bearbeitungsintensitäten** eingesetzt. Unter «normal» ist eine praxisübliche Arbeitsweise zu verstehen, die unter günstigen Bedingungen im Herbst eine befriedigende Saatbettbereitung



für Getreide (Anken *et al.* 1996) und im Frühjahr nach Winterfurche eine ausreichende Saatbettfeinheit für Kartoffeln, Zuckerrüben und andere Kulturen ermöglicht. Bei der Federzinkenegge entsprach dies zwei Arbeitsgängen mit etwa 8 km/h und beim Zinkenrotor und der Kreiselegge einem Arbeitsgang mit etwa 4 km/h bei üblichen Umfangsgeschwindigkeiten der Werkzeuge. Mit der Extremvariante «intensiv» wurde eine auf schwierigste Verhältnisse abgestimmte Arbeitsweise gewählt, um auch die möglichen Folgewirkungen einer «Überbearbeitung» aufzeigen zu können. Bei der Federzinkenegge bedeutete

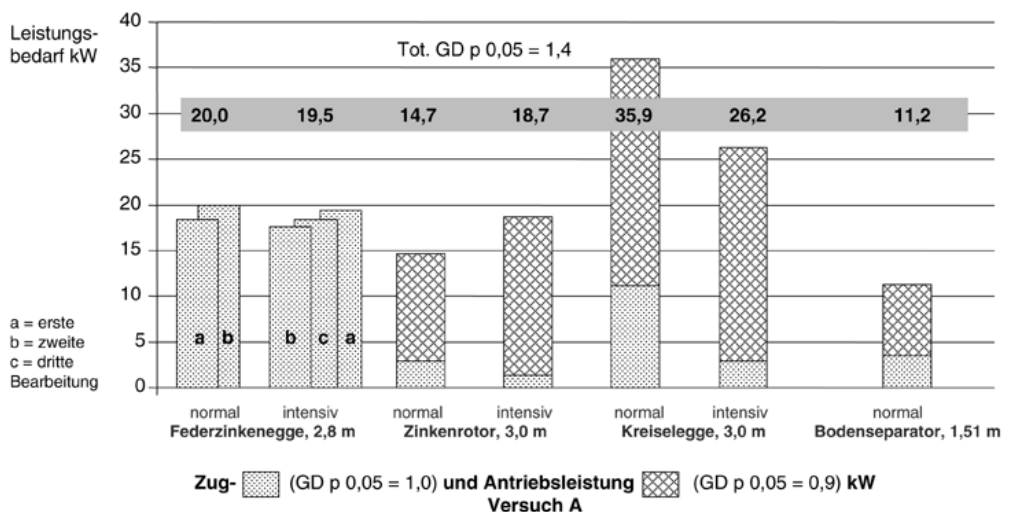
dies eine Erweiterung von zwei auf drei Arbeitsgänge und bei den angetriebenen Geräten eine Verminderung der Arbeitsgeschwindigkeit auf 43 % und Erhöhung der Werkzeug-Drehzahlen auf 373 % (Zinkenrotor) und 425 % (Kreiselegge).

Sommer- und Frühlingsbearbeitung - breites Spektrum

Für zwei Versuche, die als Streifen in Split-plot-Anordnung mit drei Wiederholungen angelegt wurden, stand ein ausgeglichenes Feld mit einer lehmigen, skeletthaltigen Braunerde zur Verfügung. Mit einer Sommerbearbeitung nach Wintergetreide und Pflugfurche (Versuch A,

Abb. 2. Unterschiede in der Bearbeitungsstruktur von Sommer/Herbst und Frühjahr. Parabraunerde, schwach humos, lehmig (21 % Ton, 33 % Schluff), skeletthaltig, tiefgründig.

Abb. 3. Bedarf an Zug- und Antriebsleistung bei ausgetrocknetem, hartem Boden.



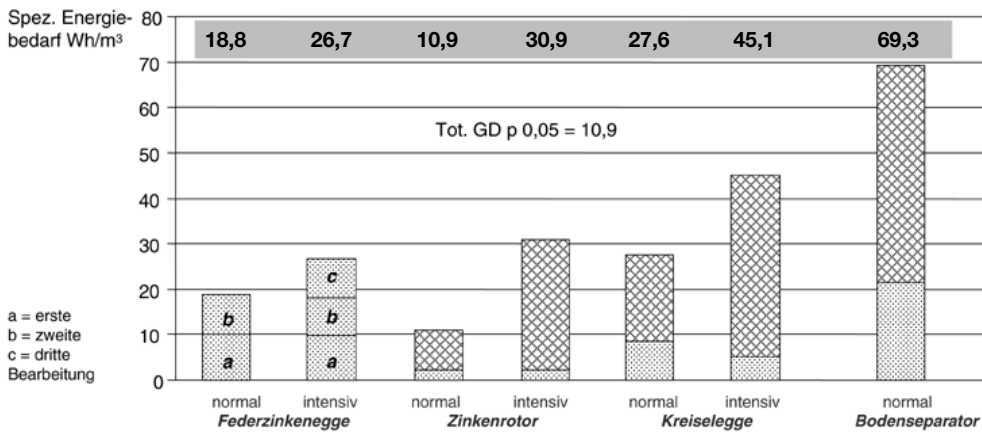


Abb. 4. Spezifischer Zug- (a) (GD p 0,05 = 3,2) und Antriebs- (b) energiebedarf (GD p 0,05 = 8,1) Wh/m³ bezogen auf den bearbeiteten Boden, Versuch A.

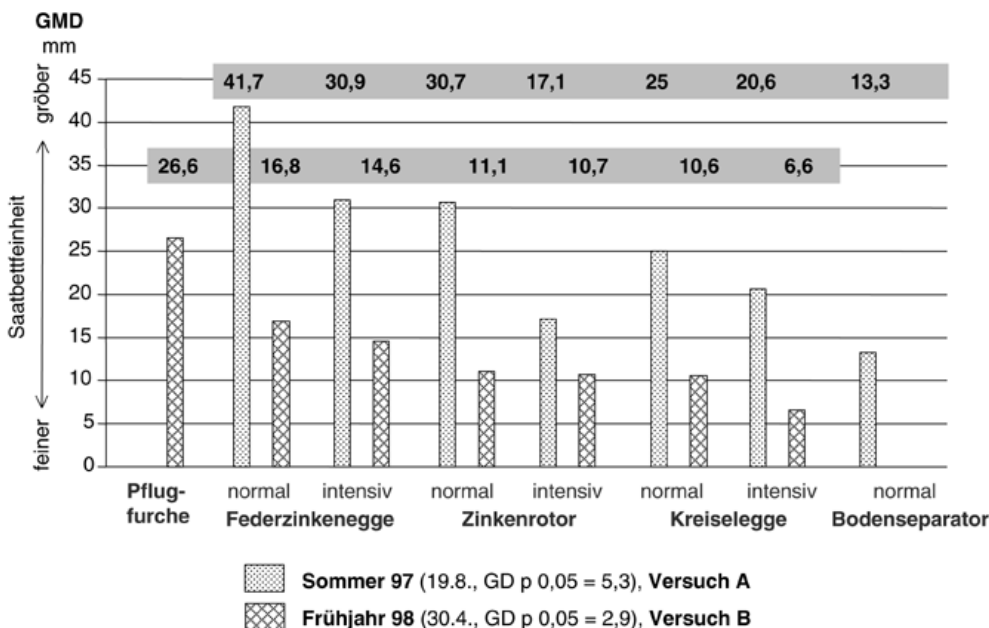
Pflügen 15.8.97) und einer Frühjahrsbearbeitung nach Winterpflugfurche (Versuch B, Pflügen 14.1.98) konnten für die Saatbettbereitung typische Bodenzustände erfasst werden (Abb. 2). So stellten die harten Schollen des ausgetrockneten Bodens im Sommer 1997, wo auch der Energiebedarf der Geräte ermittelt werden konnte, höchste Anforderungen an die Bearbeitung. Selbst bei den Varianten «intensiv» und nach Bodenseparator war nebst den zerkleinerten Schollen nur wenig Feinerde zu finden. Im Versuch B im Frühjahr hatte die Frosteinwirkung schon beim gepflügten Boden deutliche Spuren hinterlassen: Nach der Bearbeitung des mitteleuchten Bodens (23,5 %

grav. Wassergehalt) waren bei der visuellen Beurteilung der Saatbettqualität nur noch geringfügige Unterschiede sowohl zwischen den Geräten als auch zwischen den Intensitätsvarianten auszumachen.

Leistungs- und Energiebedarf gegensätzlich (Versuch A)

Der **Zugleistungsbedarf** fiel bei der Federzinkenegge mit 18 bis 20 kW am höchsten aus (Abb. 3). Einen relativ geringfügigen Zugleistungsbedarf zeigten sowohl der Zinkenrotor als auch die Kreiselegge besonders bei den tieferen Arbeitsgeschwindigkeiten der Variante «intensiv». Der **Antriebs- und Gesamtleistungsbedarf** (Antriebs- und Zugleistung)

Abb. 5. Bearbeitungsstruktur nach Pflugfurche im Sommer (A) und nach Winterpflugfurche im Frühjahr (B).



lag mit 26 kW und 36 kW bei der Kreiselegge am höchsten und der Gesamtleistungsbedarf beim Bodenseparator mit 11 kW am tiefsten.

Grundlegend anders verhält es sich beim **spezifischen Energiebedarf** (Abb. 4). Im Gegensatz zum Leistungsbedarf wird hier von einer einheitlichen Bezugsgrösse, nämlich dem bearbeiteten Bodenvolumen, ausgegangen. Die unterschiedlichen Kenngrössen wie Arbeitsbreite und -tiefe sind hier mitberücksichtigt, nicht aber das unterschiedliche Bearbeitungsergebnis. Am wenigsten Energie mit 10,9 Wh/m³ benötigte der Zinkenrotor bei normaler Arbeitsweise. Weitaus am meisten Energie wurde mit 69,3 Wh/m³ bei der Bodenseparierung verbraucht. Dabei benötigten die Reibauflagen auf den Siebbändern trotz einem vergleichsweise geringen Antriebsleistungsbedarf relativ viel Antriebsenergie. Ausschlaggebend ist hier die geringe Arbeitsgeschwindigkeit und -breite dieses Gerätes.

Stark unterschiedliche Bearbeitungseffekte

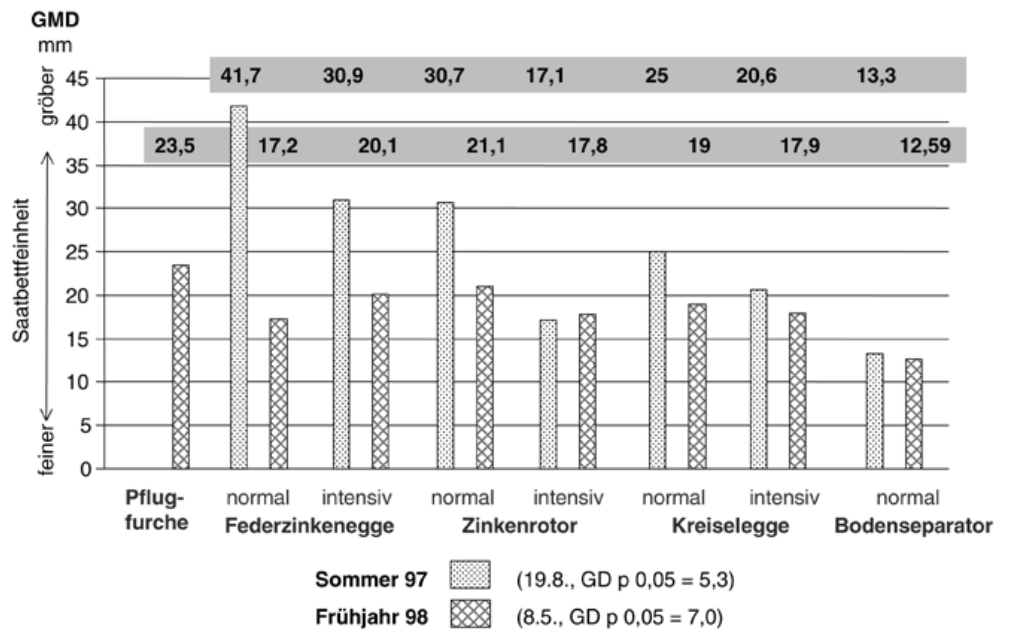
Der Bearbeitungseffekt auf das Bodengefüge des Saatbettes wurde durch die Entnahme von Bodenproben (4 Mal zirka 20 kg/Wiederholung aus 0-10 cm Tiefe) und nach der Trocknung durch ein späteres Sortieren (Quadratsiebe mit 2,5/5/10/20/40/80 mm Teilung) ermittelt. Als Kenngrösse für diese Siebanalyse wird der **GMD-Index** (mm) (Gewogener Mittlerer Schollen-Durchmesser im mm) benutzt (Kemper und Rosenau 1986). Ein tiefer GMD steht somit für ein feineres und ein hoher GMD für ein gröberes Saatbett.

Bei der **Frühjahrsbearbeitung** (Versuch B) resultierten bei allen Geräten und Varianten deutlich geringere GMD-Werte (mittlere Reduktion 60%) als bei

der Sommerbearbeitung (A, Abb. 5). So zeigte der gepflügte, ansonsten aber nicht weiter bearbeitete Boden im Frühjahr eine feinere Saatbettstruktur als nach drei Durchgängen mit der Federzinkenegge oder der normalen Bearbeitung mit dem Zinkenrotor im Sommer. Die Wirkung der Frostgare kam auch dadurch zum Ausdruck, dass der harte Boden im Sommer eine Probe nicht zuließ, dies im Frühjahr hingegen problemlos möglich war. Zwischen den Bearbeitungsintensitäten «normal» und «intensiv» waren die Unterschiede in der Saatbett-Feinheit bei der **Sommerbearbeitung** beträchtlich; bei der Frühjahrsbearbeitung jedoch deutlich geringer, besonders beim Zinkenrotor. Die größte Saatbettstruktur hinterließ die Federzinkenegge (Scholldurchmesser bis 10 cm bei trockener Sommerbearbeitung im Versuch A «normal»), gefolgt vom Zinkenrotor und der Kreiselegge. Das feinste Saatbett zeigte der Bodenseparator.

Die Saatbettstruktur des Sommersversuches (A) wurde nach **Winterbrache** noch einmal im Frühjahr untersucht. Mit Ausnahme des «Zinkenrotor intensiv» zeigten alle Verfahren deutlich geringere GMD-Werte (Abb. 6). Damit wird deutlich, dass die Winterwitterung auch das Gefüge von bearbeitetem Boden noch weiter verfeinern kann.

Zinkenrotor mit höchster Energieeffizienz (Versuch A)
Die Division des reziproken GMD-Wertes durch den spezifischen Energiebedarf ergibt die **Energieeffizienz** (in der Folge als «Index» bezeichnet). Eine hohe Energieeffizienz bedeutet, dass mit relativ wenig Energie eine ausreichende Bearbeitungsstruktur erreicht werden kann. Analog dazu die Annahme, dass



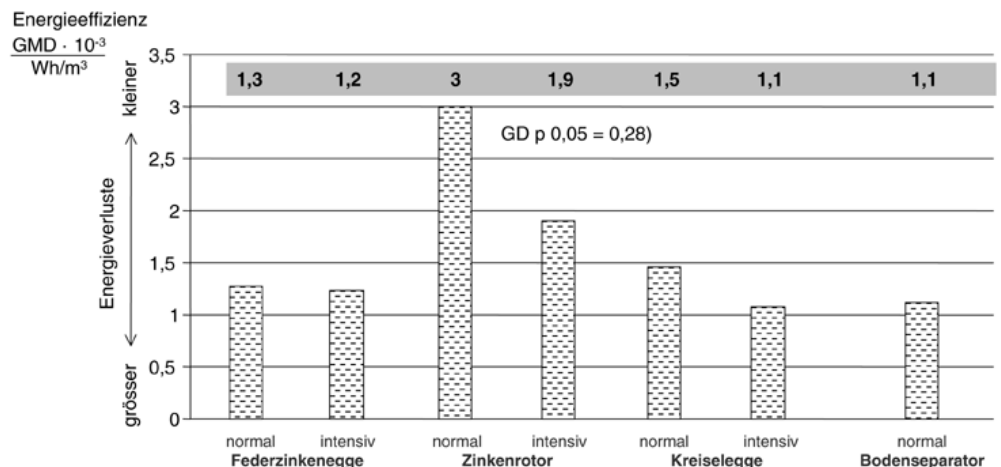
der Boden dabei weniger beansprucht wird als bei einer tiefen Energieeffizienz, wo eine in den Boden abgegebene mechanische Energieeinheit eine weniger intensive Zerkleinerung der Schollen bewirkt.

Unter den sehr schwierigen Bearbeitungsbedingungen im Hochsommer mit trockenem, hartem Boden konnte mit dem **Zinkenrotor** und dem Index 3 die höchste Energieeffizienz erzielt werden (Abb. 7). Die Variante «intensiv» führte im Vergleich zu «normal» sowohl bei diesem Gerät als auch bei der **Kreiselegge** zu einer deutlichen Verschlechterung der Energieeffizienz. Bei der **Federzinkenegge**

fiel die Energieausnutzung ungünstiger aus und ist zwischen zwei und drei Arbeitsgängen praktisch gleich (Index 1,3 und 1,2). Vor allem bei diesem Gerät ist zu berücksichtigen, dass sich die energetischen Betrachtungen hier nur auf die Bearbeitung beziehen und die Energie für die Fortbewegung des Traktors nicht mitberücksichtigt ist. Zudem sind die Verluste der Energieübertragung über die Räder des Traktors bedeutend höher als bei Zapfwellenantrieb. In der Praxis verschiebt sich somit die Relation hinsichtlich Energieausnutzung noch zusätzlich zu Ungunsten des gezogenen Gerätes, besonders wenn es mehrere Arbeitsgänge erfordert. Der **Bo-**

Abb. 6. Versuch A: Veränderung der Struktur (GMD) des bearbeiteten Bodens vom Sommer bis zum Frühjahr.

Abb. 7. Energieeffizienz (1000/GMD/Wh/m³) bezogen auf den bearbeiteten Boden, Versuch A.



denseparator als kein eigentliches Bodenbearbeitungsgerät zeigt mit dem Index 1,1 eine vergleichsweise tiefe Energieeffizienz. Die Verwendung von «Klutenquetschwalzen» statt Reibauflagen auf den Siebbändern (von der FAT 1992 vorgeschlagen, Spiess *et al.* 1992), könnte sich hier allerdings positiv auswirken.

Folgerungen

Witterung und Bewirtschaftung können den Bodenzustand und damit die Effizienz der Bodenbearbeitung in hohem Masse beeinflussen. So hatte selbst eine sehr intensive Bearbeitung im Sommer bei ausgetrocknetem hartem Boden zwar eine entsprechende Schollenzerkleinerung, aber wenig Feinerdebildung zur Folge. Nach Winterpflugfurche desselben, mittelschweren Bodens und Bearbeitung im Frühjahr fiel die Saatbettstruktur nach derselben Bearbeitungsintensität bis zu dreimal feiner als im Vorsommer aus. Durch Frosteinwirkung wurde auch das gröbere Saatbett des im Vorsommer bearbeiteten Bodens bis zum Frühjahr deutlich feiner.

Nach der Bearbeitung von hartscholligem Boden sind sowohl zwischen den Gerätesystemen als auch zwischen den Bearbeitungsintensitäten visuelle und auch messbare Unterschiede in der Saatbettfeinheit zu erken-

Bodenbearbeitung: Ermittlung der Bearbeitungstiefe mit Ultraschall; Bodenmasse als Bezugsgrösse

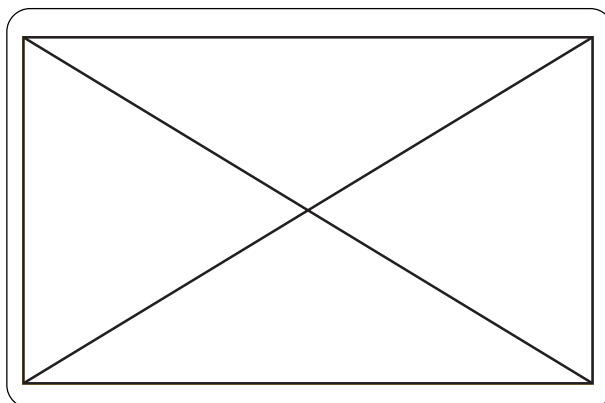
Im Hinblick auf energetische Fragen besonders betreffend des spezifischen Energiebedarfs sollte im Feldversuch die Arbeitstiefe möglichst gleichzeitig zur Zugkraft- und Drehmomentmessung ermittelt werden können. Denn im Gegensatz zur vollen Arbeitsbreite kann die Arbeitstiefe nicht als Konstante betrachtet werden. Selbst bei Geräten mit Nachlaufwerkzeugen (Walze, Krümmler) variiert die Einsinktiefe (und damit die Arbeitstiefe) in Abhängigkeit vom wechselnden Auflagedruck, der Arbeitsgeschwindigkeit und der Bodenbeschaffenheit. Mit der relativ kostengünstigen Ultraschall-Distanzmessung ist eine kontinuierliche Erfassung der Arbeitstiefe möglich (Abb. 8). Ein am Gerät befestigter Ultraschallsensor misst in bestimmten Intervallen die Strecke x die bei Geräten mit nicht federnden Arbeitswerkzeugen von der Konstante k subtrahiert wird. Die Differenz $k-x$ ergibt die praktische Arbeitstiefe. Bei Bearbeitungsgeräten mit federnden Werkzeugen (Vibrozinken) ist die entsprechende Durchbiegung verbunden mit einer Änderung von k experimentell zu ermitteln und in der Gleichung zu berücksichtigen. Da das Volumengewicht des bearbeiteten Bodens je nach Gerätesystem variieren kann, wird vorgeschlagen, auch diesen Kennwert mit einer einfachen Sonde zu bestimmen und den spezifischen Energiebedarf auf die Masse des bearbeiteten Bodens zu beziehen.

nen. So war selbst nach drei Arbeitsgängen mit der Federzinkenegge das Saatbett noch gröber als nach den zapfwellengetriebenen Geräten und normaler Arbeitsintensität. Diese Unterschiede waren allerdings nach Frosteinwirkung während des Winters im folgenden Frühjahr visuell kaum noch auszumachen.

Eine normale Saatbettbearbeitung erforderte unter schwierigen Bodenverhältnissen je nach Ge-

rätesystem einen spezifischen Zug- und Antriebsenergiebedarf von zirka 11 bis 30 Wh/m³ und bei höchster Intensität (Bodenseparierung im Kartoffelbau) bis zu 70 Wh/m³ bearbeiteten Bodens, beziehungsweise 9-14 Wh/m². Diese Energiemenge entspricht in der Grössenordnung dem Energie-Input, welcher die Handarbeit mit der Hacke unter vergleichbaren Voraussetzungen erfordert (Luder 2000). Die vorliegenden Versuche zeigen, dass die

Abb. 8. Kontinuierliche Messung der Arbeitstiefe am bearbeiteten Boden mittels Ultraschallsensor. k = gerätespezifische Konstante, x = Messgrösse (links). Stechzylinder für die Bestimmung des Volumengewichtes (rechts).



Bodenstruktur durch die natürlichen Einwirkungen viel grösseren Veränderungen unterworfen ist als durch die mechanische Bodenbearbeitung. Innerhalb des Gesamtenergiehaushaltes des Bodens spielt die Bodenbearbeitung nur eine unbedeutende Rolle. So kann der Energieumsatz etwa bei intensiver Sonneneinstrahlung oder Frosteinwirkung schon innerhalb einer Stunde um ein Vielfaches höher liegen.

Mit steigendem Zerkleinerungswiderstand des Bodens (= zunehmende Stabilität) nimmt auch die Bedeutung von zapfwellenangetriebenen Geräten hinsichtlich Energieeffizienz zu. Für eine bestimmte, vom Feinheitsgrad des Saatbettes her vergleichbare Bearbeitung bei normaler Einsatzweise und ausgetrocknetem, hartem Boden, zeigte der Zinkenrotor die höchste Energieeffizienz. Im Vergleich zu Federzinkenegge, Kreiselegge und Bodenseparator benötigte er um 58, 52 beziehungsweise 64 % weniger Zug- und Antriebsenergie. Bedingt durch den ungünstigeren Wir-

kungsgrad der Energieübertragung über die Antriebsräder und die Mehrfahrten, vergrössert sich die Differenz zur Zinkenegge beim praktischen Gesamtenergieverbrauch noch zusätzlich. Geringe Arbeitsgeschwindigkeiten und überhöhte Umfangsgeschwindigkeiten wirken sich dagegen sowohl beim Zinkenrotor als auch bei der Kreiselegge negativ auf die Energieeffizienz aus. Bei leicht bearbeitbaren Böden liegt die Energieeffizienz von Federzinkenegge, Zinkenrotor und Kreiselegge jedoch nahe beieinander.

Literatur

- Anken A., Hilfiker T., Sandri R. und Sartori L., 1996. Saatbettbereitung, FAT-Berichte 484.
- Kemper W.D. and Rosenau R.C., 1986. Aggregate stability and size distribution. *Methods of soil science of America* part 1 no 9.
- Luder W., 2000. ETH-Vorlesung über Arbeitswissenschaft.
- Spiess E., Näf E., Amman H. und Heusser J., 1992. Bodenseparierung im Kartoffelbau, FAT-Berichte 422.

- Spiess E., Anken T., Heusser J., Weisskopf P., Högger C. und Oberholzer H.-R., 2000. Folgewirkung von Bodenbearbeitungsmassnahmen. *Agrarforschung* 7(8), 354-359.

RÉSUMÉ

Travail du sol: intrant énergétique et structure du lit de semences

Sur des sols pour lesquels le travail du sol exige un intrant énergétique élevé, les systèmes de travail du sol présentent des différences considérables concernant l'effet du travail du sol ainsi que les besoins et l'efficacité énergétiques. A ces égards, les systèmes actifs (entraînés par prise de force) l'emportent sur les outils passifs, en particulier la herse rotative à axe horizontal. L'augmentation excessive de l'intensité du travail du sol s'est avérée inefficace. L'intrant énergétique se situe dans le même ordre de grandeur que celui requis pour la houe à main. Par comparaison aux flux énergétiques naturels qui ont une influence beaucoup plus élevée sur la structure du sol, l'énergie appliquée par le travail paraît cependant relativement faible même dans le cas d'une intensité importante du travail du sol.

SUMMARY

Soil tillage: energy input and seedbed structure

On soils requiring a high energy input for tillage, tillage methods show quite considerable differences with regard to work efficiency, energy requirements and efficiency. In all these respects, active (PTO driven) systems provide better results than passive implements. This is particularly true of the rotary tiller. Increasing the work intensity excessively has proved to be inefficient. The energy input is approximately the same as what is required for the hand hoe. In comparison to natural energy flows which have a much higher influence on soil structure, the energy required seems to be relatively low, even in case of a high work intensity.

Key words: soil tillage, energy, energy efficiency, seedbed structure