

Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrübenenertrag

Influence of Continuous Minimum Tillage on Soil Chemical Properties and Sugar Beet Yield

J. Dieckmann & H.-J. Koch

Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen

Zusammenfassung

Zu Beginn der 1990er Jahre wurde auf landwirtschaftlichen Großbetrieben ein Bodenbearbeitungsversuch mit langjährig differenziert bearbeiteten, ortsfesten Großparzellen angelegt. In diesen Versuch wurde zwischen 2003 und 2005 eine Studie zum Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und deren Beziehung zum Ertrag von Zuckerrübe integriert. Abnehmende Bearbeitungsintensität vom Verfahren Pflug (25–30 cm tief) über Mulch (10–15 cm tief) bis hin zur Direktsaat führte bei Zuckerrübe zu einem deutlichen Rückgang des Bereinigten Zuckerertrages. Gleichzeitig wurde bei pflugloser Bodenbearbeitung eine Anreicherung von organischem Kohlenstoff (C_{org}) und Gesamtstickstoff (N_t) sowie ein Anstieg des C_{org}/N_t -Verhältnisses in der Oberkrume beobachtet. Der Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium wurde nicht von der Bodenbearbeitung beeinflusst, während bei Phosphor und Kalium eine Anreicherung in der Oberkrume wie bei C_{org} und N_t beobachtet wurde. Eine geringfügige Abreicherung im unteren Abschnitt der Krume bei reduzierter Bodenbearbeitung trat nur bei Kalium auf.

Insgesamt belegen die Untersuchungen, dass eine Reduzierung der Bearbeitungsintensität nicht zwangsläufig zu einer eingeschränkten Nährstoffversorgung führt. In den meisten Umwelten wurde mit den erhöhten Humusgehalten sowie geringfügig höheren Nährstoffgehalten in der Oberkrume des Bodens sogar ein positiver Effekt des Pflugverzichts auf diese Parameter der Bodenfruchtbarkeit beobachtet, der sich tendenziell förderlich auf das Pflanzenwachstum auswirken dürfte. Der Minderertrag von Zuckerrübe bei langjährigem Pflugverzicht ist somit überwiegend auf Veränderungen im Boden zurückzuführen, die nicht ursächlich mit unzureichender Nährstoffversorgung zusammenhängen.

Schlüsselworte: Zuckerrübe, Bodenbearbeitung, Direktsaat, Nährstoffe, P, K, Mg, C_{org} , N_t , C_{org}/N_t -Verhältnis

Summary

In the beginning of the 1990th a large-scale field trial with permanent plots on arable farms in Germany was established to determine the effect of various tillage systems, i. e. mouldboard ploughing (25–30 cm deep), conservation tillage with a rigid tine cultivator (10–15 cm deep) and direct drilling on crop growth. In 2003–2005 the effect of tillage treatments on soil chemical properties and sugar beet yield was investigated. Reduction of tillage intensity signif-

icantly decreased white sugar yield. However, with conservation tillage and direct drilling concentration of soil organic carbon (C_{org}), soil nitrogen (N_t) and C_{org}/N_t ratio increased in the upper layer of the topsoil, but remained unaffected in the lower topsoil and subsoil. Similarly, plant available P and K was accumulated in the upper topsoil, but K slightly decreased in lower topsoil horizon. Mg was not influenced by tillage treatments.

This investigation shows that conservation tillage and direct drilling do not necessarily limit nutrient supply of crops compared to mouldboard ploughing. On the contrary, higher humus and nutrient concentrations found in the upper topsoil of several sites may indicate enhanced soil fertility and, moreover, improved conditions for plant growth with ploughless tillage. Obviously, yield reductions in sugar beet going along with reduced tillage are caused by alterations of soil properties other than nutrient status.

Key words: Sugar beet, soil tillage, direct drilling, nutrients, P, K, Mg, C_{org} , N_t , C_{org}/N_t ratio

Einleitung

Pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren haben in den vergangenen Jahren in rasch steigendem Ausmaß Einzug in die landwirtschaftliche Praxis gehalten (MERKES et al. 2003, BECKER 2003). Gemeinsam ist ihnen der Einsatz mischend an Stelle wendend arbeitender Geräte, während Intensität und Tiefe des Eingriffs in die Krume sehr variabel sind. Neben zahlreichen ökologischen Vorteilen, wie z. B. der Verminderung des Erosionsrisikos (SCHMIDT et al. 2002), der Steigerung der Biodiversität (KREUTER 2006) sowie der Erhaltung bzw. Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit (CAPRIEL 2005), bieten konservierende Bodenbearbeitung und Direktsaat das Potential, durch verminderte Kosten den Deckungsbeitrag zu steigern (DIECKMANN et al. 2006). Voraussetzungen für den ökonomischen Erfolg reduzierter Bearbeitungsverfahren und ihre Akzeptanz in der Praxis sind, neben geringeren Produktionskosten, hohe Erträge sowie Qualitäten des Erntegutes (DIETSCH 2003).

Für den Anbau von Wintergetreide sind pfluglose Bodenbearbeitungsverfahren optimiert und etabliert (EPPERLEIN 2001), was von zahlreichen Autoren in Versuchen mit Ertragsgleichheit oder sogar Ertragssteigerung bei konservierender gegenüber pflügender Bodenbearbeitung dokumentiert wurde (KAHNT 1969, SCHLÜTER 2003, CHERVET et al. 2005, DIECKMANN et al. 2006). Demgegenüber reagiert die Zuckerrübe auf eine reduzierte Bearbeitungsintensität oft mit Mindererträgen (HOFFMANN 1997, KÖNIG et al. 2005). Vor allem der vollständige Verzicht auf Bodenbear-

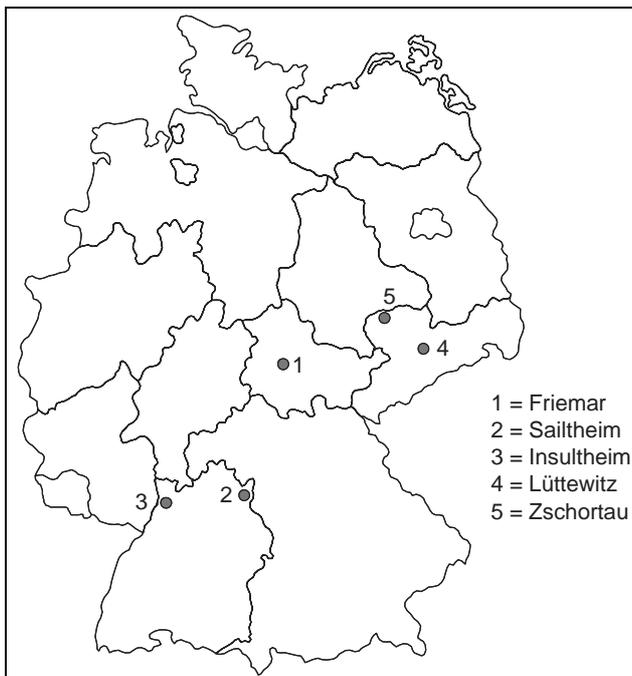


Abb. 1: Lage der Versuchsstandorte
Location of the experimental sites

beitung (Direktsaat) führt häufig zu einem deutlichen Ertragsverlust gegenüber einer Bearbeitung mit dem Pflug (WALDORF & SCHULZE 2003, LÜTKE-ENTRUP et al. 2003). Eine Ursache für Mindererträge von pfluglos bestellten Zuckerrüben kann bei nahezu vollständigem Verzicht auf Lockerung das Über- bzw. Unterschreiten des für das Pflanzenwachstum optimalen Lagerungsdichte- bzw. Porenvolumenbereiches sein (HARRACH & VORDERBRÜGGE 1991). Auch der in der vorliegenden Versuchsserie regelmäßig aufgetretene Minderertrag von Zuckerrüben korrelierte mit einer aus erhöhten Lagerungsdichten und verminderten Porenvolumen hervorgegangenen Degradation der Bodenstruktur in der ehemals bearbeiteten Krume (DIECKMANN et al. 2006).

Neben bodenphysikalischen Kenngrößen verändert die Bodenbearbeitung aber auch biologische und chemische Eigenschaften und kann so ebenfalls die Ertragsbildung der Feldfrüchte beeinflussen (DEXTER 2004). So berichten KAHNT (1971), EHLERS et al. (1972), DREW & SAKER (1978, 1980), KNITTEL et al. (1985), SARRANTONIO & SCOTT (1988), PEKRUN et al. (2003) und VAMERALI et al. (2003) bei vollständigem Verzicht auf Bodenbearbeitung bzw. stark reduzierter Eingriffsintensität von einer Anreicherung der Nährstoffe P, K, Mg und einer Erhöhung des pH-Werts an der Bodenoberfläche, die mit einer deutlichen Abreicherung in tieferen Schichten der Krume einhergeht. Geringe Wassergehalte können insbesondere in den Sommermonaten im Oberboden die Diffusionsraten der Nährstoffe zu den Pflanzenwurzeln senken (ENGELS et al. 1994). Somit kann eine Umverteilung von Nährstoffen mit höheren Konzentrationen in der austrocknungsgefährdeten Oberkrume deren Verfügbarkeit für die Pflanzenwurzeln zeitweise einschränken und sich negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken (FOY 1992, SHARPLEY et al. 1992, THOMAS et al. 2007).

Durch die verminderte Einmischung in tiefere Bodenschichten konzentriert sich bei konservierender Bodenbearbeitung oder Direktsaat darüber hinaus auch organische Substanz an der Bodenoberfläche (BECKER 2003, THOMAS et al. 2007). Eine Humusanreicherung in der obersten Bo-

denschicht kann wiederum die Mineralisation von Stickstoff zumindest zeitweilig vermindern (FRANZLUEBBERS & ARSHAD 1996, SILGRAM & SHEPHERD 1999). Sofern die niedrigere N-Nachlieferung des Bodens nicht durch eine erhöhte N-Düngung kompensiert wird, können niedrigere Erträge nach reduzierter Bodenbearbeitung im Vergleich zur Pflugbearbeitung die Folge sein (KNITTEL et al. 1985, LIEBMAN et al. 1995).

Vor diesem Hintergrund wurde in der vorliegenden Arbeit der Frage nachgegangen, ob der Minderertrag von Zuckerrüben bei langjährig pflugloser Bodenbearbeitung durch Veränderungen in den chemischen Bodeneigenschaften und der Nährstoffverfügbarkeit bedingt ist. Dazu wurden in einem Zeitraum von drei Jahren an fünf Standorten eines Langzeitbodenbearbeitungsversuches detaillierte Untersuchungen zum Nährstoffstatus des Bodens sowie dem Ertrag von Zuckerrüben durchgeführt.

Material und Methoden

Standorte und Bodenbearbeitung

Zu Beginn der 90er Jahre wurden auf Flächen des Geschäftsbereichs Landwirtschaft der Südzucker AG in typischen Ackerbauregionen Süd- und Ostdeutschlands großflächige Bodenbearbeitungsversuche angelegt. An jedem Standort wurde ein möglichst homogener Schlag in etwa gleich große, ortsfeste Großparzellen mit einer Größe zwischen 2,5 und 8 ha unterteilt. In den Jahren 2003-2005 erfolgten an ausgewählten Standorten dieser Versuchsserie Untersuchungen zu den chemischen Bodeneigenschaften der Flächen. Dabei wurden der Standort Friemar in 2003, die Standorte Sailtheim und Insultheim in 2004 und die Standorte Lüttewitz und Zschortau in 2005 beprobt (Abb. 1).

Neben einer konventionellen Variante „Pflug“ mit einer jährlichen Herbstfurche auf Krumentiefe (25-30 cm) wurde das konservierend bearbeitete Verfahren „Mulch“ angelegt (Abb. 2). In der Variante Mulch erfolgte keine wendende Bodenbearbeitung, sondern lediglich eine mischende Bodenbearbeitung mit einem Grubber bei einer maximalen Eingriffsintensität von ca. 10-15 cm. Weiterhin wurde ein Verfahren Direktsaat eingerichtet, das zunächst gänzlich ohne Bodenbearbeitung durchgeführt wurde. In den ersten Versuchsjahren misslang jedoch in diesem Verfahren wiederholt die Bestandesetablierung bei Zuckerrüben aufgrund mangelnder Bedeckung des Saatgutes mit feinkrümeligem Boden. Dies führte zu unzureichenden Bestandesdichten. Deshalb wurde ab 1996 im Verfahren Direktsaat an allen Standorten eine flache Bodenbearbeitung (max. 3-5 cm tief) zur Aussaat der Zuckerrüben eingeführt.

Die Bodenbearbeitung wurde mit herkömmlichen Maschinen aus den beteiligten landwirtschaftlichen Betrieben durchgeführt. Je nach Maschinenausstattung der Betriebe und spezifischer Notwendigkeit in Abhängigkeit vom Bodenzustand wurden auf den Standorten unterschiedliche Geräte zur Stoppelbearbeitung (Spatenrolle, Scheibenegge, Schwergrubber) eingesetzt. Bei der Aussaat der Zuckerrüben kamen ausschließlich Einzelkornsäegeräte mit Mulchsaateinrichtung der Firmen Kleine und Accord zum Einsatz.

Pflanzenbauliche Maßnahmen

Die Fruchtfolge auf den Versuchsstandorten war dreifeldrig: Auf Zuckerrüben, die generell nach einer Zwischenfrucht angebaut wurden, folgte ein zweimaliger Anbau von

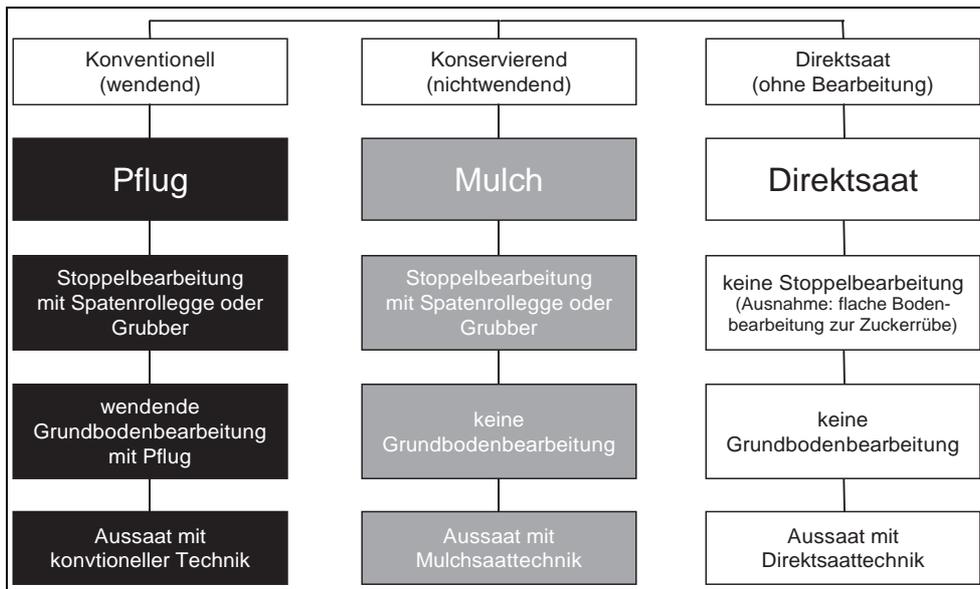


Abb. 2: Bodenbearbeitungsverfahren – Definition und Verfahrensablauf
Soil tillage operations of treatments – definition and process flow

Winterweizen. Die Aussaatstärke wurde an die Bodenbearbeitungsverfahren angepasst. Da erfahrungsgemäß ein niedriger Feldaufgang bei Zuckerrübe im Verfahren Direktsaat zu erwarten war, wurde in diesem Verfahren die Ablageentfernung gegenüber den anderen Verfahren um 2 cm verringert (in der Regel auf 17 cm).

Der Pflanzenschutz wurde betriebsüblich nach guter fachlicher Praxis und in den Bearbeitungsvarianten soweit wie möglich einheitlich durchgeführt. Eine verfahrensspezifische Differenzierung wurde im Bedarfsfall beim Einsatz von Herbiziden, Molluskiziden und Rodentiziden vorgenommen.

Grunddüngung und mineralische Stickstoffdüngung erfolgten in Anlehnung an die EUF-Düngeempfehlung in gleicher Aufwandmenge über alle Bodenbearbeitungsvarianten eines Standortes, wobei die Höhe zu Zuckerrüben zwischen 50 und 120 kg N ha⁻¹ lag.

Chemische Bodenuntersuchung

Um den Einfluss der unterschiedlichen Bodenbearbeitungssysteme auf bodenchemische Eigenschaften erfassen zu können, wurde in jeder Bodenbearbeitungsparzelle eines Standortes ein Messareal von 40 m x 40 m ausgewiesen. Diese Messareale sollten möglichst geringe Unterschiede in ihren bodentypologischen und bodenartigen Eigenschaften innerhalb eines Standortes aufweisen. Dabei wurde insbesondere der Bereich von 0-45 cm Bodentiefe betrachtet. In den ausgewiesenen Messarealen wurde nachträglich die Textur bestimmt, indem aus einer Profilgrube, die an den Rändern einer für das Messareal repräsentativen Stelle angelegt wurde, je eine Mischprobe homogenisierten Bodens aus den Tiefenbereichen 3-7 cm, 13-18 cm, 23-27 cm und 38-43 cm entnommen wurde. An diesen Proben wurde die Textur der Feinerde (Korngröße <2,0 mm) mittels Nasssiebung für die Sandfraktionen und mittels Pipettmethode nach Köhn (SCHLICHTING et al. 1995) für die Schluff- und Tonfraktionen bestimmt. Bei der Pipettanalyse kam der "SEDIMAT 4-12" (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg, Deutschland) zum Einsatz.

Für die chemische Bodenanalyse wurden die Messareale zunächst in vier Quadranten mit einer Größe von 10 m x 10 m unterteilt. Drei der vier Quadranten wurden im Frühjahr vor der Zuckerrübensaat mit je 60 Pürkhauer-Ein-

stichen bis 45 cm Bodentiefe beprobt. Die Proben wurden unterteilt in die Tiefenbereiche 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm und 30-45 cm und zu homogenisierten Mischproben zusammengefasst. Zur Bestimmung des Gesamtkohlenstoffes (C_t) und des Gesamtstickstoffes (N_t) wurden die Proben getrocknet und mit einer Kugelmühle pulverisiert. Anschließend wurden die C_t- und N_t-Gehalte durch trockene Veraschung bei 1200°C bestimmt, indem die Anteile an CO₂ und N₂ aus der Verbrennung gaschromatographisch getrennt und gemessen wurden (vario EL, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Deutschland). Der Gehalt an carbonatbürtigem Kohlenstoff (C_{carb}) wurde in der Scheibler-Apparatur durch Austreiben des CO₂ mit Salzsäure und dessen gasvolumetrische Messung ermittelt. Der organische Kohlenstoff (C_{org}) wurde aus der Differenz zwischen C_t und C_{carb} berechnet.

Die Analyse von pH-Wert und Magnesium-Gehalt erfolgte aus dem Calciumchlorid-Auszug (Mg_{CaCl2}), die von Phosphor und Kalium aus dem CAL-Auszug (P_{CAL}, K_{CAL}). Die Nährstoffgehalte in den Extrakten wurden anschließend spektralphotometrisch bzw. mit Flammen-Emissions-Spektrometrie bestimmt (ANONYMUS 2004).

Sämtliche Gehalte wurden in mg elementarem Nährstoff je 100 g Boden angegeben. In den Abbildungen zu den Grundnährstoffen wurden zusätzlich die Gehaltsklassen gemäß Einstufung durch die LUFA Augustenberg angegeben (ANONYMUS 2002). Dabei entsprechen zu geringe Gehalte den Gehaltsklassen A und B. Optimale bzw. überhöhte Nährstoffversorgung liegt in den Gehaltsklassen C bzw. D und E vor. Für die Nährstoffe Kalium und Magnesium wurde zwischen den mittelschweren Standorten Sailtheim, Lütewitz und Zschortau (Tongehalt 12-25%) sowie den schweren Standorten Friemar und Insultheim (Tongehalt >25%) bei der Einteilung der Gehaltsklassen differenziert. Bei Darstellung des Mittelwertes über die Standorte wurden die Gehaltsklassen für mittelschwere Standorte angegeben.

Ernte und Qualitätsanalyse

In Zuckerrüben wurden innerhalb jedes Messareals Parzellen mit unterschiedlicher Bestandesdichte (53.000, 65.000 und 83.000 Pflanzen ha⁻¹) in vierfacher Wiederholung als Blockanlage durch Vereinzeln von Hand angelegt. Die eingestellten Bestandesdichtestufen spie-

Tab. 1: Textur des Bodens in Krume (3-27 cm) und Unterboden (38-43 cm), analysiert wurde Boden aus repräsentativen Profilgruben (5 Versuchsstandorte 2003-2005)

Soil texture in topsoil (3-27 cm) and subsoil (38-43 cm), data result from representative pits (5 experimental sites 2003-2005)

Standort und Jahr	Bodenbearbeitung	Tiefe	Bodenart*	Ton	Feinschluff	Grob- und Mittelschluff [g 100g ⁻¹]	Sand
Friemar 2003	Pflug	Krume	Tu4	29,6	7,1	60,6	2,8
		Unterboden	Tu4	29,3	6,4	61,0	3,3
	Mulch	Krume	Tu4	29,0	7,6	60,4	3,0
		Unterboden	Tu4	31,3	7,8	58,1	2,8
	Direktsaat	Krume	Tu4	27,6	6,6	63,1	2,8
		Unterboden	Tu4	27,1	5,4	64,3	3,2
Sailtheim 2004	Pflug	Krume	Ut4	20,4	9,9	66,0	3,6
		Unterboden	Tu4	31,5	8,4	58,3	1,9
	Mulch	Krume	Ut4	17,5	8,5	71,0	2,9
		Unterboden	Tu4	31,4	8,4	58,4	1,7
	Direktsaat	Krume	Ut4	22,0	9,4	66,2	2,4
		Unterboden	Tu4	33,6	8,8	55,7	1,9
Insultheim 2004	Pflug	Krume	Lt3	35,9	14,7	34,8	14,6
		Unterboden	Lt3	38,4	14,1	33,3	14,2
	Mulch	Krume	Lu2	29,5	10,4	40,8	19,3
		Unterboden	Lu2	28,6	10,5	41,7	19,1
	Direktsaat	Krume	Lu2	29,1	12,1	38,4	20,4
		Unterboden	Lu2	24,3	8,8	42,1	24,8
Lüttewitz 2005	Pflug	Krume	Ut3	13,5	4,9	77,6	3,9
		Unterboden	Ut3	15,5	5,5	76,3	2,7
	Mulch	Krume	Ut3	14,9	5,8	76,7	2,7
		Unterboden	Ut3	20,9	5,7	71,1	2,3
	Direktsaat	Krume	Ut3	13,9	5,6	76,9	3,7
		Unterboden	Ut3	14,0	6,6	77,4	2,0
Zschortau 2005	Pflug	Krume	Uls	16,5	6,7	48,1	28,7
		Unterboden	Uls	16,9	6,5	48,9	27,7
	Mulch	Krume	Uls	12,5	5,2	46,0	36,4
		Unterboden	Uls	12,5	5,3	47,2	35,0
	Direktsaat	Krume	Uls	13,4	5,1	47,4	34,1
		Unterboden	Slu	14,4	5,1	44,9	35,7

* nach Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005

geln häufig im Feld anzutreffende Pflanzendichten wider. Dabei wurden nach dem Zufallsprinzip möglichst gleichmäßig Lücken 1. und 2. Ordnung (innerhalb einer Reihe fehlten maximal ein bzw. zwei Pflanzen in Folge) eingefügt. Von den sechs Reihen (45 cm Abstand) einer Parzelle (2,7 m breit x 8 m lang) wurden kurz vor der Großparzellenernte die mittleren drei Reihen von Hand gerodet (10,8 m²). Neben dem Gewicht wurde die technische Qualität der Rüben an repräsentativen Teilproben bestimmt. Die Analyse der Parameter der technischen Qualität wurde unter standardisierten Bedingungen nach HOFFMANN (2006) durchgeführt. Die Berechnung des Standardmelasseverlustes und des Bereinigten Zuckerertrages (BZE) erfolgten nach MÄRLÄNDER et al. (2003). Nachfolgend werden ausschließlich Mittelwerte dargestellt, da die Interaktion zwischen Bodenbearbeitung und

Bestandesdichte nicht signifikant war (DIECKMANN et al. 2006).

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Softwarepaket SAS (Version 8.1, SAS Inc., N.C., USA). Tests auf Normalverteilung wurden mit der Prozedur UNIVARIATE (DUFNER et al. 2002) durchgeführt. Nicht normalverteilte Daten wurden mit dem Box-Cox-Macro transformiert, um eine Normalverteilung zu erreichen (ANONYMUS 2006). Die Varianzanalyse wurde mit der Prozedur MIXED durchgeführt. Die Wirkung der Bodenbearbeitung wurde mit der Kombination Standort/Jahr (Umwelt) als unabhängige Wiederholungen geprüft. Die Umwelten und alle Interaktionen wurden als zufällige Effekte modelliert. Der statisti-

sche Vergleich von Bearbeitungseffekten erfolgt getrennt nach den Beprobungstiefen mit dem Tukey-Test bei $p \leq 5\%$.

Um die Ursachen der Ertragswirkung der Bodenbearbeitung aufzuklären, wurden die Erträge um das Ortsmittel bereinigt. Die daraus entstandenen Differenzerträge zum jeweiligen Standortmittel wurden mittels einfacher Regression durch die Prozedur REG mit den chemischen Bodenparametern korreliert.

Ergebnisse

Texturanalyse

Um festzustellen, ob die im Vorfeld zu den Bodenuntersuchungen festgelegten Messareale hinsichtlich ihrer bodentypologischen und bodenartigen Eigenschaften vergleichbar sind, wurde eine Texturanalyse durchgeführt. Diese ergab, dass an den Standorten Friemar, Sailtheim und Zschortau die Korngrößenverteilung in den unterschiedlichen Bearbeitungsvarianten sehr einheitlich war (Tab. 1). In Insultheim waren die Ton- und Feinschluffgehalte im Messareal der gepflügten Variante in Krume und Unterboden deutlich höher als in den konservierend bearbeiteten Varianten. Damit einhergehend waren die Sandgehalte im Verfahren Pflug niedriger. Am Standort Lüttenwitz war der Tongehalt im Unterboden der Variante Mulch gegenüber den anderen Varianten erhöht.

Ertrag

Der BZE variierte zwischen den Umwelten von mehr als 12 t ha^{-1} in Friemar 2003 bis zu etwa 6 t ha^{-1} in Insultheim 2004 (Mittel der Bearbeitungsvarianten, nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten sank der BZE mit abnehmender Bearbeitungsintensität von $10,36 \text{ t ha}^{-1}$ im Verfahren Pflug auf $10,05 \text{ t ha}^{-1}$ im Verfahren Mulch und $9,06 \text{ t ha}^{-1}$ im Verfahren Direktsaat (nicht dargestellt). Der Ertragsunterschied des Verfahrens Direktsaat zu den Systemen Pflug und Mulch war signifikant, während die Erträge der Verfahren Pflug und Mulch nicht signifikant verschieden waren.

C_{org} , N_t und C_{org}/N_t -Verhältnis

Im Mittel aller Bearbeitungsvarianten und Beprobungstiefen war der C_{org} -Gehalt in Insultheim 2004 mit ca. 2% am höchsten und in Sailtheim 2004 und Zschortau 2004 mit ca. 1% am niedrigsten (nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten führte reduzierte Bodenbearbeitung mit abnehmender Intensität zu einer signifikanten Anreicherung von C_{org} in der Oberkrume (0-10 cm, Abb. 3 links). Der C_{org} -Gehalt lag im Verfahren Mulch um 0,3% und bei Direktsaat um 0,5% über dem des Systems Pflug. In den darunter liegenden Bodenschichten unterschieden sich die Varianten nicht signifikant voneinander. In der mittleren und unteren Krume (10-30 cm) lagen die Werte in den Verfahren Mulch und Direktsaat niedriger als in der Oberkrume. Bei Pflugbearbeitung war der C_{org} -Gehalt demgegenüber in der gesamten Krume einheitlich. Die niedrigsten C_{org} -Gehalte traten in allen Verfahren im Unterboden (30-45 cm) auf.

Der N_t -Gehalt zeigte eine sehr ähnliche Abstufung wie der C_{org} -Gehalt in Abhängigkeit von Umwelt und Bodenbearbeitung. Eine wesentliche bearbeitungspezifische Differenzierung war in der Oberkrume zu verzeichnen: Hier stieg der N_t -Gehalt mit abnehmender Bearbeitungsintensität an (Abb. 3, Mitte). Beim C_{org}/N_t -Verhältnis traten geringe Unterschiede auf. Abnehmende Bearbeitungsintensität führte zu einem Anstieg des C_{org}/N_t -Verhältnisses in der Oberkrume (Abb. 3, rechts).

pH-Wert

Der pH-Wert lag in allen Umwelten im optimalen Bereich zwischen 7,0 und 7,5 (Abb. 4 A). Während in der Oberkrume keine Differenzierung zwischen den Bearbeitungsvarianten auftrat, zeigten sich mit zunehmender Bodentiefe Unterschiede im pH-Wert. Im Verfahren Pflug lag der pH-Wert über den gesamten Untersuchungsbereich konstant bei 7,4, während er in den pfluglosen Verfahren in den unteren Bodenschichten bis auf 7,0 abnahm (Mulch). In Unterkrume und Unterboden war der Unterschied zwischen den Bearbeitungsverfahren Pflug und Mulch signifikant, Direktsaat wies mittlere Werte auf.

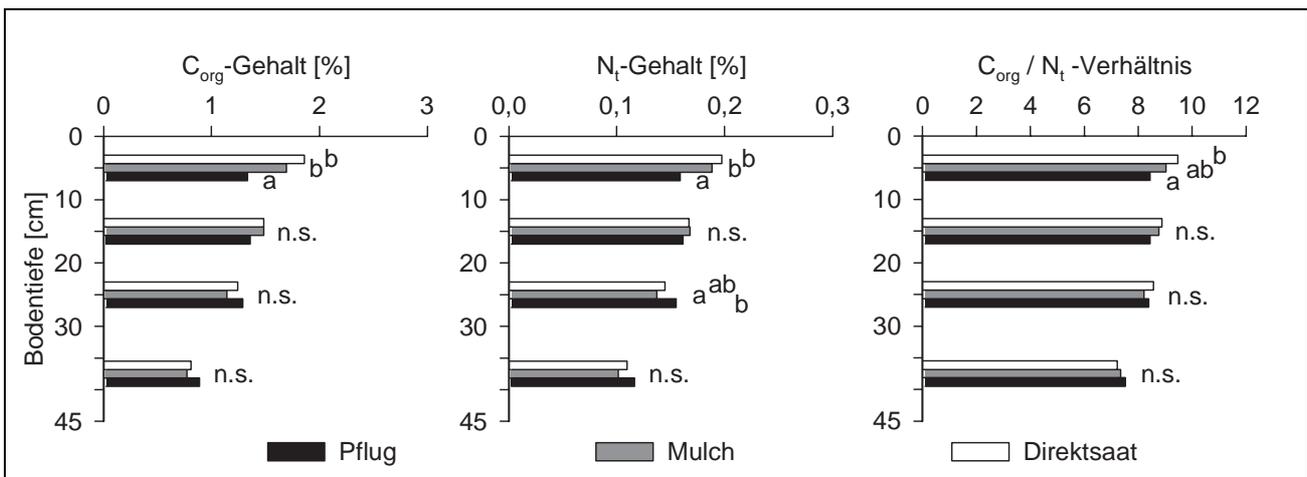


Abb. 3: Organischer Kohlenstoffgehalt (C_{org} , links), Gesamtstickstoffgehalt (N_t , Mitte) und C_{org}/N_t -Verhältnis (rechts) in Krume (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) und Unterboden (30-45 cm) nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung, Mittel über fünf Umwelten; unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe, $p \leq 0,05$, Tukey-Test, n.s. = nicht signifikant

Effect of soil tillage on the concentration of soil organic carbon (C_{org} , left), total soil nitrogen (N_t , centre) and C_{org}/N_t -ratio (right) in topsoil (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) and subsoil (30-45 cm), means across five environments; different letters indicate significant differences within one depth, $p \leq 0.05$, Tukey-Test, n.s. = not significant

Magnesium

Der Gehalt an Mg_{CaCl_2} lag im Mittel der Umwelten und Bodenbearbeitungsverfahren in der Gehaltsklasse C (7,5-13,5 mg Mg_{CaCl_2} 100 g⁻¹ Boden; Abb. 4 B). Dabei traten vergleichsweise große, ungerichtete Unterschiede zwischen den Umwelten auf (nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten wurde kein signifikanter Effekt der Bodenbearbeitung auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium gemessen.

Phosphor

Im Mittel der Umwelten und Bearbeitungsverfahren lag der Gehalt an P_{CAL} in der Krume im unteren Bereich der Gehaltsklasse C (5,5-10,5 mg P_{CAL} 100 g⁻¹ Boden; Abb. 4 C). Niedrige P_{CAL} -Gehalte wurden vor allem in den Umwelten Friemar 2003 (ca. 4 mg P_{CAL} 100 g⁻¹ Boden) und Lüttewitz 2005 (ca. 6 mg P_{CAL} 100 g⁻¹ Boden) gemessen. In 0-10 cm Tiefe war ein signifikanter Anstieg des P_{CAL} -Gehaltes mit abnehmender Bearbeitungsintensität zu beobachten. In Mittel- und Unterkrume traten keine gerichteten Effekte der Bodenbearbeitung mit gegenüber ohne Pflug auf. Auffällig war, dass im Verfahren Mulch in allen Bodenschichten mit Ausnahme der Oberkrume deutlich niedrigere P_{CAL} -Gehalte vorlagen. Gegenüber Direktsaat war dieser Unterschied in der Unterkrume signifikant. Während in den Verfahren Direktsaat und Mulch der P_{CAL} -Gehalt von der Ober- bis zur Unterkrume tendenziell sank, war er im System Pflug in allen Schichten einheitlich. Im Unterboden war der P_{CAL} -Gehalt deutlich geringer als in der Krume

und unterschied sich zwischen den Bearbeitungsverfahren nicht.

In den einzelnen Umwelten differierte das Niveau der P_{CAL} -Gehalte zwischen den Bearbeitungsvarianten teilweise beträchtlich, ohne dass ein gerichteter Effekt sichtbar wurde (nicht dargestellt).

Kalium

Im Unterschied zur P-Versorgung lagen die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium (K_{CAL}) im Mittel der Umwelten überwiegend im Bereich der Gehaltsklasse B (5,5-12 mg K_{CAL} 100 g⁻¹ Boden; Abb. 4 D). Auffällige Unterschiede zwischen den Umwelten existierten dabei nicht (nicht dargestellt). Im Mittel der Umwelten stieg der K_{CAL} -Gehalt mit abnehmender Bearbeitungsintensität in der Oberkrume an (Abb. 4 D). In der Unterkrume lag der K_{CAL} -Gehalt im Boden der Variante Pflug tendenziell höher als in der Variante Direktsaat und signifikant höher als in der Variante Mulch. In den Verfahren Direktsaat und Mulch war ein ausgeprägter Tiefengradient mit sinkenden Werten von der Oberkrume bis zum Unterboden vorhanden, während im System Pflug die Werte in allen Schichten der Krume gleich waren und zum Unterboden hin deutlich abfielen.

Korrelationen zwischen Nährstoffgehalt und Ertrag

Die Gehalte der untersuchten pflanzenverfügbaren Nährstoffe korrelierten in allen Bodenschichten negativ mit dem Ertrag (nicht dargestellt). Die engsten Korrelationen

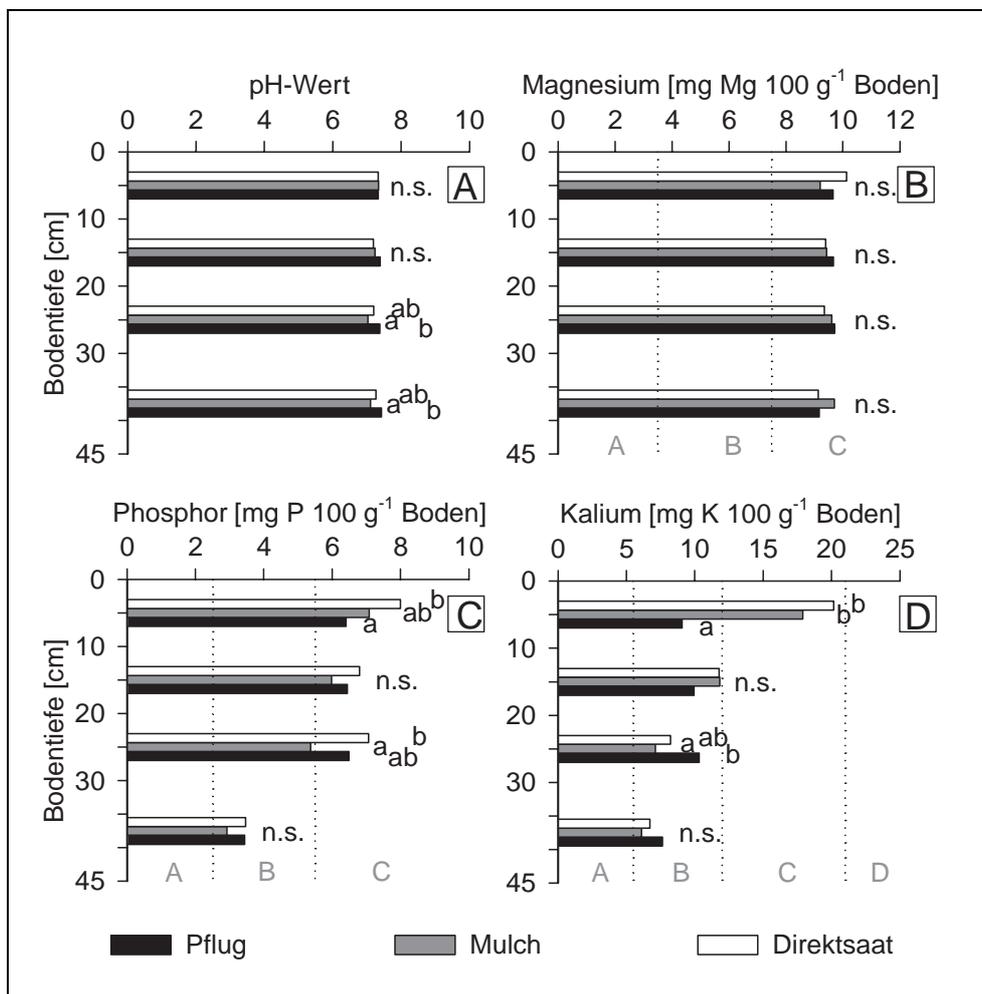


Abb. 4: pH-Wert (A) und Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium (B), Phosphor (C) und Kalium (D) in Krume (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) und Unterboden (30-45 cm) nach langjährig differenzierter Bodenbearbeitung, Mittel über fünf Umwelten; Großbuchstaben kennzeichnen den Versorgungszustand des Bodens nach ANONYMUS (2002) für mittelschwere Standorte; unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb einer Tiefe, $p \leq 0,05$, Tukey-Test, n.s. = nicht signifikant

Effect of soil tillage on pH (A) and the concentration of plant available magnesium (B), phosphorus (C) and potassium (D) in topsoil (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm) and subsoil (30-45 cm), means across five environments; upper-case letters indicate soil nutrient status according to ANONYMUS (2002) for medium textured soils, lower-case letters indicate significant differences within one depth, $p \leq 0.05$, Tukey-Test, n.s. = not significant

waren bei Kalium und Phosphor in den Tiefen 0-10 cm und 0-30 cm zu finden (r zwischen -0,17 und -0,5). Mit steigendem Nährstoffgehalt nahm der Bereinigte Zuckrertrag der Zuckerrüben ab.

Diskussion

Langjährig differenzierte Bodenbearbeitung führt zu erheblichen Veränderungen im System Boden-Pflanze (PEKRUN et al. 2003). Eine Reduzierung der Bearbeitungsintensität von Pflug über Mulch bis hin zur Direktsaat beeinflusst in unterschiedlicher Weise ein breites Spektrum von Kenngrößen des Bodens und damit letztendlich auch Wachstum und Ertrag der Kulturpflanzen. So führt konservierende Bodenbearbeitung in der Praxis bei Wintergetreide und Winterraps oft zu gleichen oder sogar höheren Erträgen, während beim Anbau von Zuckerrübe der Ertrag deutlich geringer sein kann als bei konventioneller Bearbeitung (KNITTEL et al. 1985, MEIER et al. 1993, LIEBHARD 1997, AHL et al. 1998, TOMANOVÁ et al. 2006). Vor allem der vollständige Verzicht auf Bodenbearbeitung (Direktsaat) kann bei Zuckerrübe zu einem deutlichen Minderertrag führen (LÜTKE-ENTRUP et al. 2003, WALDORF & SCHULZE 2003), wie er auch in der vorliegenden Versuchsserie durchgängig an allen Standorten gemessen wurde. Aber auch im Verfahren Mulch war der BZE an drei von fünf Versuchsstandorten niedriger als im Verfahren Pflug. Die Ergebnisse der Handerte zeigen somit eindeutig, dass die Bodenbearbeitung einen erheblichen Einfluss auf das Wachstum von Zuckerrüben hat.

Als eine mögliche Ursache für bodenbearbeitungsbedingte Mindererträge wurden von DIECKMANN et al. (2006) veränderte bodenphysikalische Eigenschaften wie erhöhte Trockenrohdichte, erhöhter Eindringwiderstand sowie eine geringere Luftkapazität bei reduzierter Bodenbearbeitung, insbesondere bei Direktsaat, vorgeschlagen. Neben biologischen und physikalischen Eigenschaften wird durch Bodenbearbeitung aber auch ein breites Spektrum an chemischen Eigenschaften mit großer Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit beeinflusst (DEXTER 2004). Ob die physikalischen Veränderungen der Bodenstruktur allein das Wachstum der Zuckerrüben beeinflussen, oder ob zusätzlich chemische Veränderungen im Boden Ursache für Ertragsunterschiede sind, war Gegenstand der vorliegenden Untersuchung. Trotz der teilweise beträchtlichen räumlichen Distanzen zwischen den Messarealen (50-100 m) waren dabei die Unterschiede zwischen den Böden der Bearbeitungsvarianten am jeweiligen Standort hinsichtlich Bodentyp und -art so gering, dass eine Überlagerung verfahrensspezifischer Effekte auf die Messgrößen durch Unterschiede in den Bodeneigenschaften nicht anzunehmen ist.

C_{org} , N_t und C_{org}/N_t -Verhältnis

Der C_{org} -Gehalt wird unmittelbar vom Anteil an Ton und Feinschluff im Boden beeinflusst. Mit steigendem Feinbodenanteil nimmt der Gehalt an C_{org} zu (DENEFF et al. 2004, PLANTE et al. 2006). Auch im vorliegenden Versuch wurden an den Standorten mit höheren Ton- und Feinschluffgehalten höhere C_{org} -Gehalte gemessen.

Die Anreicherung von organischer Substanz in der Oberkrume bei langjährig reduzierter Bodenbearbeitung, wie sie im vorliegenden Versuch gemessen wurde (Abb. 3 A), beobachteten unter anderem auch RASMUSSEN (1999), STOCKFISCH et al. (1999) und WILLIAMS et al. (2005). Dabei wirkt sich ein erhöhter Humusgehalt als langsam fließende Nährstoffquelle im Allgemeinen positiv auf die Bodenfruchtbarkeit und somit förderlich für das Wachstum der

Kulturpflanze aus. Weiterhin werden Luft- und Wasserhaushalt positiv beeinflusst (CAPRIEL 2005). Dennoch kann in bestimmten Fällen ein höherer Humusgehalt das Pflanzenwachstum einschränken, indem die eigentlich positive Eigenschaft der organischen Substanz, Nährstoffe zu puffern, zu einer übergangsweise geringeren Verfügbarkeit führt. Insbesondere Stickstoff, der in den meisten Böden zu 95% in organischer Form gebunden ist, kann durch den Einbau in die mikrobielle Biomasse kurzfristig dem Pflanzenzugriff entzogen werden (WRIGHT & HONS 2005).

In zahlreichen Versuchen wurde gezeigt, dass Stickstoff einen vergleichsweise großen Einfluss auf das Wachstum und die Ertragsbildung der Zuckerrübe hat (ALLISON et al. 1996, DRAYCOTT & CHRISTENSON 2003, MALNOU et al. 2003). Zum Erreichen maximaler Zuckererträge ist eine schnelle Ausbildung des Blattapparates von großer Bedeutung (RÖVER 1995). Dazu benötigt die Zuckerrübe Stickstoff, der den Pflanzen insbesondere in der Jugendentwicklung ausreichend zur Verfügung stehen sollte (ERBAS & FISCHBECK 1972). Bei konservierender Bodenbearbeitung können diesbezüglich Probleme auftreten: Im vorliegenden Versuch weist das C_{org}/N_t -Verhältnis in allen Umwelten mit vergleichsweise niedrigen Werten eine hohe Qualität und somit Abbaubarkeit des Humus aus (Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005). Allerdings ist mit abnehmender Bearbeitungsintensität ein Anstieg des C_{org}/N_t -Verhältnisses in der Oberkrume zu beobachten, was u. a. einen langsameren Abbau des Humus zur Folge haben kann. Zusätzlich könnte die von zahlreichen Autoren beobachtete langsamere Erwärmung des Bodens mit Mulchauflage gegenüber einer gepflügten Bodenoberfläche (EHLERS 1992) die Stickstofffreisetzung aus der organischen Bodensubstanz im Frühjahr gehemmt haben. Daraus kann sich eine leicht verzögerte Jugendentwicklung in den reduziert bearbeiteten Verfahren (insbesondere Direktsaat) ergeben haben (BAEUMER & KÖPKE 1989, PEKRUN et al. 2003). Diese Hypothese wird durch Beobachtungen aus dem Feld unterstützt. Allerdings berichteten die Leiter der Versuchsbetriebe oft, dass die pfluglos bestellten Zuckerrüben gegenüber den konventionell angebauten Rüben in trockenen Sommermonaten erst zu einem späteren Zeitpunkt Welkeerscheinungen zeigten und somit zuvor entstandene Ertragsunterschiede ausgleichen könnten. Ähnliche Beobachtungen machten auch CHERVET et al. (2006). Andere Autoren hingegen fanden bei praxisüblicher Düngung, wie sie im vorliegenden Versuch angewendet wurde, keinen negativen Einfluss konservierender Bearbeitungsverfahren auf die Jugendentwicklung von Zuckerrüben (HOFFMANN et al. 1997, TOMANOVÁ et al. 2006).

Voraussetzung für eine exakte Beurteilung, ob bodenbearbeitungsbedingte Unterschiede in der N-Versorgung den Wachstumsverlauf der Zuckerrüben beeinflussen, ist die Analyse des Nährstoffgehaltes von Pflanzenmaterial während der Vegetationsperiode (TOMANOVÁ et al. 2006). Dieser wurde im Rahmen des vorliegenden Versuchs jedoch nicht erfasst.

pH-Wert, Phosphor, Kalium und Magnesium

Der pH-Wert lag ausnahmslos in den Gehaltsklassen C und D und somit im optimalen Bereich für das Pflanzenwachstum. Die Unterschiede zwischen den Bearbeitungsvarianten waren sehr gering. Daher kann ein wesentlicher Einfluss des pH-Wertes auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen und somit auf das Pflanzenwachstum ausgeschlossen werden.

Bei der Betrachtung der einzelnen Versuchsstandorte war die Gehaltsklasse aller untersuchten Nährstoffe innerhalb eines Standortes oft sehr ähnlich, wobei die Versor-

gung mit P_{CAL} und Mg_{CaCl_2} weitgehend in der Gehaltsklasse C und die mit K_{CAL} überwiegend etwas niedriger in der Gehaltsklasse B lag.

Aber nicht nur zwischen den Umwelten, sondern auch innerhalb einer Umwelt variierten die Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten sowohl im bearbeiteten als auch im unbearbeiteten Bereich der Krume teilweise beträchtlich. Ein Grund für diese großen Unterschiede könnte in einer unterschiedlichen Vorgeschichte der Varianten liegen, die im Nachhinein nicht mehr nachvollziehbar ist. Möglicherweise gehörten die vergleichsweise großen Versuchsschläge früher zu unterschiedlichen Betrieben, die über eine unterschiedliche Zufuhr von Wirtschafts- oder Mineraldüngern unterschiedliche Bodenvorräte geschaffen haben.

Die Bodenbearbeitung hatte keinen Einfluss auf die Magnesiumgehalte sowie die Magnesiumverteilung im Boden. Demgegenüber zeigten nahezu alle pfluglos bearbeiteten Varianten eine starke Anreicherung von Phosphor und Kalium in der Oberkrume. Diese Beobachtung wurde auch von zahlreichen anderen Autoren gemacht (KAHNT 1971, EHLERS et al. 1972, DREW & SAKER 1978, 1980, KNITTEL et al. 1985, SARRANTONIO & SCOTT 1988, DÍAZ-ZORITA & GROVE 2002, PEKRUN et al. 2003, VAMERALI et al. 2003). Beim Kalium war die Anreicherung deutlich stärker ausgeprägt als beim Phosphor. Analog war in der Krume auch die Stratifikation (abnehmende Gehalte mit zunehmender Tiefe) beim Kalium größer als beim Phosphor und führte bei Erstem an einigen Standorten in den unteren Bodenschichten zu einer Abreicherung. Diese war in der Unterkrume des Verfahrens Mulch im Mittel der Umwelten signifikant. Ähnliche Beobachtungen machten auch HÜTSCH & STEFFENS (1992), RICHTER (1995) und ZIHLMANN et al. (2001).

Im Gegensatz zur Stratifikation der Nährstoffgehalte bei reduzierter Bodenbearbeitung ist die weitgehend homogene Verteilung von P_{CAL} und K_{CAL} in der Krume bei Pflugbearbeitung typisch. Insgesamt waren die P_{CAL} -Gehalte bei reduzierter Bodenbearbeitung höher als im Verfahren Pflug. Dies kann teilweise durch eine ertragsbedingt unterschiedliche Nährstoffabfuhr, aber auch durch einen verminderten Nährstoffabtrag durch Wassererosion auf reduziert bearbeiteten Ackerflächen begründet sein (BISCHOFF 2006).

Die starke Stratifikation von Phosphor und insbesondere Kalium in der Krume der pfluglos bewirtschafteten Flächen führt zu der Frage, ob Phosphor und Kalium für die Zuckerrübe in allen Varianten gleich verfügbar war. Geringe Wassergehalte können die Diffusionsraten des Nährstoffes zu den Wurzeln senken und somit die Verfügbarkeit negativ beeinflussen (ENGELS et al. 1994). Bei einem Austrocknen der obersten Bodenschicht kann dies dazu führen, dass von den Pflanzen die Nährstoffe trotz hinreichender Gehalte nicht genutzt werden können. Da beim Phosphor bis auf die Umwelt Friemar 2003 auch in Mittel- und Unterkrume noch die optimale Versorgungsstufe C vorlag, ist eine verminderte Verfügbarkeit bei reduzierter Bodenbearbeitung nicht anzunehmen. Somit kann lediglich bei sehr trockenen Witterungsverhältnissen im Hochsommer eine zeitweise eingeschränkte Verfügbarkeit für Kalium vorgelegen haben. Symptome von Kaliummangel wurden jedoch niemals an den Pflanzen beobachtet.

Bei keinem der untersuchten Nährstoffe konnte eine kausale Beziehung zum Ertrag gefunden werden. Die Korrelationsanalyse zwischen Nährstoffgehalt im Boden und Rübenertrag ergab in allen Fällen einen negativen Korrelationskoeffizienten (nicht dargestellt). Da in der vorliegenden Versuchsserie die untersuchten Nährstoffe aber in mittleren Konzentrationen vorlagen, ergibt sich gemäß Einteilung in die VDLUFA-Gehaltsklassen eine geringe bis optimale Versorgung der Kulturpflanzen. Toxische Nähr-

stoffkonzentrationen, die eine Wachstumseinschränkung für die Zuckerrübe begründen könnten, scheiden somit als Ursache für einen Ertragsrückgang mit steigender Nährstoffkonzentration aus. Eine höhere Nährstoffversorgung, wie sie bei konservierender Bodenbearbeitung gemessen wurde, müsste somit eher zu einer Ertragssteigerung oder zumindest zu Ertragsgleichheit geführt haben. TOMANOVA et al. (2006) berichten in diesem Zusammenhang bei hoher N-Versorgung der Zuckerrübe von einer Förderung des Jugendwachstums durch eine Anreicherung von Grundnährstoffen in der Oberkrume bei konservierender Bodenbearbeitung. Da es keinen sachlogischen Zusammenhang für sinkende Erträge bei steigenden Nährstoffgehalten im vorliegenden Versuch gibt, scheint der Einfluss der Nährstoffversorgung von anderen, kollinear verlaufenden Effekten überlagert worden sein. In diesem Zusammenhang sind bearbeitungsbedingte Unterschiede in der Bodenstruktur (DIECKMANN et al. 2006) eine mögliche Erklärung für die vorgefundenen Ertragsunterschiede. Die zu Grunde liegenden Wirkmechanismen sind dabei noch unklar.

Schlussfolgerungen

Unterlassene (Direktsaat) sowie flach mischende (Mulch) Bodenbearbeitung verursachte im Vergleich zu wendender Bodenbearbeitung deutliche Mindererträge. Die Gehalte an pflanzenverfügbaren Nährstoffen im Boden waren bei reduzierter Bodenbearbeitung jedoch in den meisten Umwelten höher als bei Pflugbearbeitung. Es wurde eine Anreicherung von Grundnährstoffen (P, K, Mg) in der Oberkrume gemessen, im Gegenzug traten aber keine signifikant geringeren Gehalte in tieferen Bodenschichten auf. Eine geringere Nährstoffverfügbarkeit von P, K und Mg bei reduzierter Bodenbearbeitung als Ursache für Wachstumsunterschiede scheint daher unwahrscheinlich zu sein. Die erheblichen Ertragsunterschiede zwischen den Bodenbearbeitungsvarianten können somit nicht auf Veränderungen der bodenchemischen Eigenschaften zurückgeführt werden. Eine präzisere Aussage ließe sich nur aus der Untersuchung von Nährstoffgehalten der Zuckerrübe während der Vegetationsperiode ableiten. Daher erscheint der Erklärungsansatz von DIECKMANN et al. (2006), in dem Unterschiede in der Bodenstruktur als wesentliche Ursachen für Wachstumsunterschiede ausgemacht wurden, eher geeignet zu sein.

Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau, Ochsenfurt, für die finanzielle Förderung dieser Versuchsserie, sowie dem Geschäftsbereich Landwirtschaft der Südzucker AG und insbesondere Herrn Dir. H. Miller für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche. Den Betriebsleitern sei für die Durchführung aller Anbaumaßnahmen sowie Ines Wiese, Wilfried Hübener und Manfred Jordan für die umfassende Unterstützung bei der Entnahme der Nährstoffproben sowie der Durchführung der Handernt gedankt.

Literatur

AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN, 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesrepublik Deutschland, Hannover, 5. Aufl..

- AHL, C., R. G. JOERGENSEN, E. KANDELER, B. MEYER & V. WOEHLE, 1998: Microbial biomass and activity in silt and sand loams after long-term shallow tillage in central Germany. *Soil Till. Res.* **49**, 93-104.
- ALLISON, M. F., M. J. ARMSTRONG, K. W. JAGGARD, A. D. TODD & G. F. J. MILFORD, 1996: An analysis of the agronomic, economic and environmental effects of applying N fertilizer to sugarbeet (*Beta vulgaris*). *J. Agr. Sci.* **127**, 475-486.
- ANONYMUS, 2002: Tabellen und Vorgaben für die Einstufung der Grundnährstoffgehalte von Böden. LUFA Augustenberg & LFL Chemie Hohenheim. http://www.landwirtschaftw.info/servlet/PB/show/1073867_11/lufa_EinstufungderGrundnährstoffgehaltevonBöden-TabellenundVorgaben.pdf, besucht am 29.12.2006.
- ANONYMUS, 2004: Bestimmung von leicht löslichen (pflanzenverfügbaren) Haupt- und Spurennährstoffen. In: VDLUFA Methodenbuch 1, A 6, 4. Teillieferung. VDLUFA-Verlag, Darmstadt.
- ANONYMUS, 2006: SAS-Makro Box-cox-transformation. Universität Hohenheim, Institut für Bioinformatik. <http://www.unihohenheim.de/bioinformatik/bera-tung/toolsmacros/boxcox-macro.sas>, besucht am 12.11.2006.
- BAEUMER, K. & U. KÖPKE, 1989: Effects of nitrogen fertilization. In: BAEUMER, K. & W. EHLERS (Hrsg.): Energy saving by reduced tillage, 145-162. European Communities, Brüssel und Luxemburg.
- BECKER, K.-W., 2003: Bodenbearbeitung ohne Pflug – Auswirkungen auf die Dichte des Bodens und die Speicherung von Humus. *Mitt. Deut. Bodenk. Ges.* **102**, 617-618.
- BISCHOFF, J., 2006: Kopflastige Krume – Bei Phosphor: bis zu zwei Gehaltsklassen Unterschied zwischen Ober- und Unterkrume. *Neue Landwirtschaft* **6**, 37-39.
- CAPRIEL, P., 2005: Humusversorgung der Böden. <http://www.lfl.bayern.de/internet/stmlf/lfl/iab/bodenbearbeitung/13479/index.php>, besucht am 23.10.2006.
- CHEVET, A., C. MAURER, W.-G. STURNY & M. MÜLLER, 2005: Direktsaat im Praxisversuch: Einfluss auf die Struktur des Bodens. *Agrarforschung* **8**, 12-17.
- CHEVET, A., L. RAMSEIER, W.-G. STURNY, P. WEISSKOPF, U. ZIHLMANN, M. MÜLLER & R. SCHAFFLÜTZEL, 2006: Bodenwasser bei Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung* **13**, 162-169.
- DENEF, K., J. SIX, R. MERCKX & K. PAUSTIAN, 2004: Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **68**, 1935-1944.
- DEXTER, A. R., 2004: Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* **120**, 201-214.
- DÍAZ-ZORITA, M. & J. H. GROVE, 2002: Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil Till. Res.* **66**, 165-174.
- DIECKMANN, J., H. MILLER & H.-J. KOCH, 2006: Rübenwachstum und Bodenstruktur – Ergebnisse aus dem Gemeinschaftsprojekt Bodenbearbeitung. *Zuckerind.* **131**, 642-654.
- DIETSCH, A., 2003: Kosten der Zuckerrübenproduktion in bedeutenden Anbaugebieten Deutschlands. *Zuckerrübe* **6**, 296-298.
- DRAYCOTT, A. P. & D. R. CHRISTENSON, 2003: Nutrients for sugar beet production, soil-plant relationships. CAB International, Oxon, Cambridge.
- DREW, M. C. & L. R. SAKER, 1978: Effects of drilling and ploughing on root distribution in spring barley, and on the concentrations of extractable phosphate and potassium in the upper horizons of a clay soil. *J. Sci. Food Agr.* **29**, 201-206.
- DREW, M. C. & L. R. SAKER, 1980: Direct drilling and ploughing: their effects on the distribution of extractable phosphorus and potassium, and of roots, in the upper horizons of two clay soils under winter wheat and spring barley. *J. Agr. Sci.* **94**, 411-423.
- DUFFNER, J., U. JENSEN & E. SCHUMACHER, 2002: Statistik mit SAS. B. G. Teubner GmbH, Stuttgart, 2. Auflage.
- EHLERS, W., G. PAPE & W. BÖHM, 1972: Tiefenverteilung und zeitliche Änderungen der laktatlöslichen Kalium- und Phosphorgehalte während einer Vegetationsperiode in unbearbeiteten und bearbeiteten Böden. *Z. Pfl.ern. Bodenk.* **133**, 24-36.
- EHLERS, W., 1992: Reduzierte Bodenbearbeitung – Ökologische Folgen und ackerbauliche Grenzen. *VDLUFA Schriftenr.* **35**, 35-57.
- ENGELS, C., M. MOLLENKOPF & H. MARSCHNER, 1994: Effect of drying and rewetting the topsoil on root growth of maize and rape in different soil depths. *Z. Pfl.ern. Bodenk.* **156**, 139-144.
- EPERLEIN, J., 2001: Vergleichende Untersuchungen zum Einfluss konservierender Bodenbearbeitung auf ausgewählte biologische und physikalische Bodenparameter im Biosphärenresevat Schorfheide-Chorin. Diss., Berlin.
- ERBAS, S. & G. FISCHBECK, 1972: Einfluss der Stickstoffdüngung und anbautechnischen Maßnahmen auf die Blattentwicklung sowie über die Beziehungen zwischen Blattflächenindex und Wurzeltrag bei Zuckerrüben. *Z. Acker- Pfl.bau* **135**, 122-134.
- FOY, C. D., 1992: Soil chemical factors limiting plant root growth. In: Hatfield, J. L. & B. A. Stewart (Eds.): Limitations to plant root growth, 97-149. *Adv. Soil Sci.* **19**, Springer, New York.
- FRANZLUEBBERS, A. J. & M. A. ARSHAD, 1996: Soil organic matter pools during early adoption of conservation tillage in Northwestern Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **60**, 1422-1427.
- HARRACH, T. & T. VORDERBRÜGGE, 1991: Die Wurzelentwicklung von Kulturpflanzen in Beziehung zum Bodentyp und Bodengefüge. *Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 204 (Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit. Bd. 2: Bodengefüge)*, 69-82.
- HOFFMANN, C., 1997: Wachstumsanalyse von Zuckerrüben bei langjährig differenzierter Bodenbearbeitung. *Pflanzenbauwiss.* **1**, 164-170.
- HOFFMANN, C., 2006: Zuckerrüben als Rohstoff. Die technische Qualität als Voraussetzung für eine effiziente Verarbeitung. *Habil.schrift Universität Göttingen*.
- HOFFMANN, C., H. PLATTE, T. LICKFETT & H.-J. KOCH, 1997: Microbial biomass and N mineralization in relation to N supply of sugar beet under reduced tillage. *Z. Pfl.ern. Bodenk.* **160**, 187-193.
- HÜTSCH, B. & D. STEFFENS, 1992: Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf die vertikale Verteilung von verfügbarem Phosphat und Kalium im Profil von vier unterschiedlichen Bodentypen. *Agribiol. Res.* **45**, 352-359.
- KAHNT, G., 1969: Ergebnisse zweijähriger Direktsaatversuche auf drei Bodentypen. *Z. Acker- Pfl.bau* **129**, 277-295.
- KAHNT, G., 1971: NPK- und C-Veränderungen auf 3 Bodentypen nach 5 Jahren pfluglosem Ackerbau. *Landw. Forsch.* **26**, 273-280.
- KNITTEL, H., H. LANG & J. DRESSEL, 1985: Einfluss der Stickstoffdüngung auf Ertrag und N-Mineralisation einer Ackerbraunerde bei unterschiedlicher Bodenbearbeitung. *Kongressband VDLUFA-Schriftenr.* **16**, 335-343.
- KÖNIG, H.-P., H.-J. KOCH & B. MÄRLÄNDER, 2005: Wirkung von langjährig differenzierter Bodenbearbeitung und N-Düngung auf N-Aufnahme und N-Bilanz einer Zuckerrüben-Wintergetreide-Fruchtfolge. *Pflanzenbauwiss.* **9**, 19-28.

- KREUTER, T., 2006: Zum Einfluss der Bodenbearbeitung auf ausgewählte Elemente des Bodenlebens. http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7105_7110.htm, besucht am 05.12.2006.
- LIEBHARD, P., 1997: Einfluss der Primärbodenbearbeitung auf Ertrag, Ertragsverhalten und ausgewählte Qualitätskriterien von Zuckerrübe (*Beta vulgaris* L. ssp. *vulgaris* var. *altissima* Doell) im oberösterreichischen Zentralraum (Teil 8). *Bodenkultur* **48**, 3-14.
- LIEBMAN, M., S. CORSON, R. J. ROWE & W. A. HALTEMAN, 1995: Dry bean responses to nitrogen fertilizer in two tillage and residue management systems. *Agron. J.* **87**, 538-546.
- LÜTKE-ENTRUP, N., M. SCHNEIDER & J. BRAUN, 2003: Bearbeitungsgänge sparen, aber mit Augenmaß. Nur mit standortgerechten Bewirtschaftungssystemen sind die Kostenvorteile der konservierenden Bodenbearbeitung zu erschließen. *Neue Landwirtschaft, Sonderheft*, 9-14.
- MÄRLÄNDER, B., C. HOFFMANN, H.-J. KOCH, E. LADEWIG, R. MERKES, J. PETERSEN & N. STOCKFISCH, 2003: Environmental situation and yield performance of sugar beet crop in Germany: Heading for sustainable development. *J. Agron. Crop Sci.* **189**, 201-226.
- MALNOU, C. S., K. W. JAGGARD & D. L. SPARKES, 2003: A canopy approach to nitrogen recommendations for the sugar beet crop. *Zuckerind.* **128**, 673-678.
- MEIER, U., L. BACHMANN, E. BUHTZ, H. HACK, R. KLOSE, B. MÄRLÄNDER & E. WEBER, 1993: Phänologische Entwicklungsstadien der Beta-Rüben (*Beta vulgaris* L. ssp.). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. *Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.* **45**, 37-41.
- MERKES, R., H. COENEN, F. HESSE & G. SCHÜTZ, 2003: Stand der Produktionstechnik zu Zuckerrüben – Ergebnisse der Umfrage 2002. *Zuckerind.* **128**, 425-433.
- PEKRUN, C., H.-P. KAUL & W. CLAUPEIN, 2003: Soil tillage for sustainable nutrient management. In: A. EL TITI (Ed.): *Soil tillage in agroecosystems*, 83-113. CRC Press, Boca Raton.
- PLANTE, A. F., R. T. CONANT, C. E. STEWART, K. PAUSTIAN & J. SIX, 2006: Impact of soil texture on the distribution of soil organic matter in physical and chemical fractions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**, 287-296.
- RASMUSSEN, K. J., 1999: Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil Till. Res.* **53**, 3-14.
- RICHTER, U., 1995: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitungssysteme auf das Bodengefüge und den Stickstoffhaushalt. Diss., Gießen
- RÖVER, A., 1995: Ertragsbildung bei Zuckerrüben in Abhängigkeit von Blattfläche und intraspezifischer Konkurrenz. Diss., Göttingen
- SARRANTONIO, M. & T. W. SCOTT, 1988: Tillage effects on availability of nitrogen to corn following a winter green manure crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **52**, 1661-1668.
- SCHLICHTING, E., H.-P. BLUME & K. STAHR, 1995: *Bodenkundliches Praktikum*. Blackwell, Berlin, 2. Auflage.
- SCHLÜTER, K., 2003: *Mulchsaat-Praxis MSP - Monoweizen plus Mulchsaat*. DLG-Mitteilungen, H. 11.
- SCHMIDT, W., O. NITZSCHE, S. KRÜCK & W. RICHTER, 2002: Schutz von Zuckerrübenflächen vor Wassererosion und Nährstoffabtrag durch konservierende Bodenbearbeitung. *Proc.* **65**, IIRB-Kongress, 47-58.
- SHARPLEY, A. N., J. J. MEISINGER, J. F. POWER & D. L. SUAREZ, 1992: Root extraction of nutrients associated with long-term soil management. In: HATFIELD, J. L. & B. A. STEWART (Eds.): *Limitations to plant root growth*, 97-149. *Adv. Soil Sci.* **19**, Springer, New York.
- SILGRAM, M. & M. A. SHEPHERD, 1999: The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. *Adv. Agron.* **65**, 267-311.
- STOCKFISCH, N., T. FORSTREUTER & W. EHLERS, 1999: Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil Till. Res.* **52**, 91-101.
- THOMAS, G. A., R. C. DALAL & J. STANDLEY, 2007: No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in an Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil Till. Res.* **94**, 295-304.
- TOMANOVÁ, O., N. STOCKFISCH & H.-J. KOCH, 2006: Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf Wachstum und Nährstoffversorgung von Zuckerrüben während der Vegetationsperiode. *Pflanzenbauwiss.* **10**, 16-25.
- VAMERALI, T., A. GANIS, S. BONA & G. MOSCA, 2003: Fibrous root turnover and growth in sugar beet (*Beta vulgaris* var. *saccharifera*) as affected by nitrogen shortage. *Plant Soil* **255**, 169-177.
- WALDORF, N. V. & R. SCHULZE, 2003: Auswirkungen verschiedener Bodenbearbeitungsverfahren auf pflanzenbauliche Parameter. *Landinfo* **9**, 6-10.
- WILLIAMS, A., B. S. XING & P. VENEMAN, 2005: Effect of cultivation on soil organic matter and aggregate stability. *Pedosphere* **15**, 255-262.
- WRIGHT, A. L. & F. M. HONS, 2005: Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. *Soil Till. Res.* **84**, 67-75.
- ZIHLMANN, U., P. WEISSKOPF, M. MÜLLER, R. SCHAFFLÜTZEL, A. CHERVET & W. G. STURNY, 2001: Direktsaat im Praxisversuch: Einfluss auf die Nährstoff- und Humusgehalte im Boden. *Agrarforschung* **8**, 18-22.

Eingegangen am 12. März 2007;
angenommen am 23. November 2007

Anschrift der Verfasser: Jan Dieckmann und Dr. Heinz-Josef Koch, Institut für Zuckerrübenforschung, Holtenser Landstr. 77, 37075 Göttingen