

Vorsicht beim Befahren feuchter Böden: Bleibende Setzungen drohen!

Silvia Tobias, Institut für Kulturtechnik, ETH Höggerberg, CH-8093 Zürich

Auskünfte: e-mail: tobias@ifk.baug.ethz.ch, Fax +41 (0)1 633 10 84, Tel. +41 (0)1 633 36 08

ZUSAMMENFASSUNG

Das revidierte Umweltschutzgesetz sowie die zugehörige Verordnung über Belastungen des Bodens schreiben neu auch den Schutz des Bodens vor physikalischen Belastungen vor, die die Bodenfruchtbarkeit langfristig beeinträchtigen. Darunter fallen Bodenverdichtungen infolge mechanischer Belastungen. Die praktische Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes führt besonders in der Landwirtschaft zu Konflikten, da für eine effiziente Bewirtschaftung oft schlagkräftige, aber schwere Maschinen eingesetzt werden.

Bodenverdichtungen entstehen durch Zusammendrückung und Scherung, das heisst plastische Deformationen. Dieser Beitrag stellt die Ergebnisse aus vier Feldversuchen vor, in denen die vertikale Verformung des Bodens unter den Fahrzeugen *in situ* gemessen wurde. Die Setzungen der Bodenoberfläche wurden mit einem geodätischen Nivellement erfasst, diejenigen in tieferen Schichten des Bodenprofils mit einem neuen hydrostatischen Messsystem zur Unterflurnivellierung. In zwei Feldversuchen fuhren Raupenbagger über trockenen Boden, in den zwei anderen Versuchen hat ein Zuckerrübensvollernter sehr feuchte Böden befahren. Im trockenen Boden herrschte die elastische Verformung vor, in tieferen Schichten betrug die plastische Setzung nur wenige Zentimeter (max. 6 mm in 30 cm und 2 mm in 50 cm). Im Gegensatz dazu wurden im feuchten Boden bis in eine Tiefe von 60 cm Setzungen von 14 bis 24 mm erfasst. Die Grösse der Setzungen reduzierte sich von der Bodenoberfläche bis in tiefere Schichten. Dennoch blieb die Verformung über die ganze Beobachtungszeit, die im Maximum 12 Tage betrug, hinaus bestehen. Zudem wurde der Effekt mehrfacher Befahrung mit dem Oberflächen-Nivellement geprüft. Vier Überfahrten verursachten eine fast doppelt so grosse Setzung als eine einzige Überfahrt. Auch diese Oberflächenverformung blieb über die gesamte Beobachtungszeit hinaus bestehen. Aus diesen Feldversuchen kann geschlossen werden, dass in dieser kombinierten Messmethode ein grosses Potenzial für ein Langzeit-Monitoring steckt, um eine eventuelle mechanische Regeneration des Bodens von Verdichtungen zu erfassen.

Mit der Revision des Umweltschutzgesetzes (USG) und dem Erlass der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) sind die gesetzlichen Grundlagen des physikalischen Bodenschutzes gegeben. Die praktische Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes hat über nachhaltige Formen der Bodennutzung und -bewirtschaftung zu erfolgen. Da die Bodennutzung aber nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch nachhaltig sein soll, ergeben sich häufig Konflikte zwischen Bodennutzung und Bodenschutz. besonders in der Landwirtschaft ergeben sich solche Konflikte,

da diese einerseits für die Nahrungsmittelproduktion unverzichtbar ist, deren Produktionsgrundlage aber andererseits der Boden selbst ist.

Die Effizienz der landwirtschaftlichen Bodennutzung konnte in den letzten Jahrzehnten durch immer schlagkräftigere Maschinen (z. B. Mähdrescher, Zuckerrübensvollernter) wesentlich gesteigert werden (Sommer und Hartge 1991). Der grösste Nachteil dieser grossen Geräte ist ihr zum Teil sehr hohes Gewicht. Dadurch kann es infolge Zusammendrückung und Scherung zu Veränderungen der Bodenstruk-

tur kommen, die die ökologischen Funktionen des Bodens stark beeinträchtigen (Horn *et al.* 1995). Dies geschieht besonders, wenn die genannten Geräte auf feuchtem Boden eingesetzt werden, was bei der Hackfruchternte oft der Fall ist. Neuere Untersuchungen (Diserens *et al.* 1998) haben jedoch gezeigt, dass auch relativ leichte Geräte bei feuchtem Boden ökologisch schädliche Strukturveränderungen verursachen können. So kann die Grasernte im Spätherbst auf einer intensiven Kunstwiese problematisch sein.

Der Zusammenhang zwischen mechanischer Belastung, Spurtiefe und Strukturveränderungen in tieferen Bodenschichten ist seit jüngerer Zeit auch in der Schweiz Untersuchungsgegenstand verschiedener Forschungsprojekte (z. B. Gysi *et al.* 1999; Berli *et al.* 2000; Kulli *et al.* 2000). In erster Linie wird der Spannungsabbau im Boden beobachtet und mit physikalischen Bodenkennwerten (Porenverteilung, Leitfähigkeit, Infiltrationsmuster) verglichen. Der Nachteil dieser Methoden liegt darin, dass an ein und demselben Ort nicht mehrmals hintereinander gemessen werden kann, weil jedes Mal Bodenproben entnommen beziehungsweise Profile aufgegraben werden müssen. Deshalb lässt sich mit diesen Methoden besonders eine allfällige Erholung des Bodens von einer Verdichtung nur schwer beobachten. Da schädliche Bodenverdichtungen irreversible (d.h. plastische) Verformungen

(Zusammendrückung, Scherung) sind, werden neuerdings Methoden zur Messung der Bodenverformung *in situ* während der Befahrung entwickelt (Arvidsson *et al.* 2000; Horn und Rosteck 2000).

Auch bei den hier vorgestellten Untersuchungen ging es um die direkte Messung der Bodendeformation unter den Rädern landwirtschaftlicher Fahrzeuge beziehungsweise den Raupen von Baustellenfahrzeugen. Die Kombination eines geodätischen Nivellements mit einem hydrostatischen Messsystem zur Unterflurnivellierung erlaubte die Setzungen des Bodens unter der Radlast zu bestimmen und zwar nicht nur an der Bodenoberfläche, sondern auch in tieferen Schichten. Ein weiterer wichtiger Punkt war die Erfassung einer allfälligen Erholung des Bodens nach Entfernen der Auflast. Es wurde beobachtet, ob und wie weit sich der Boden in der Zeit nach der Befahrung wieder hob. Dies sollte Auskunft über das Regenerationsvermögen des Bodens liefern. Denn für eine vollständige Beurteilung des ökologischen Schadens infolge Bodenverdichtung muss auch die Fähigkeit des Bodens, Bodenverdichtungen zu regenerieren, mit einbezogen werden.

In diesem Beitrag werden die Resultate aus vier Feldversu-

chen von 1997 bis 2000 zu einer Sythese zusammengefasst. Eine ausführliche Beschreibung der beiden ersten Experimente findet sich bei Friedli *et al.* (1998).

Direkte Erfassung der Bodensetzungen

In vier verschiedenen Feldexperimenten im Juni 1997, Oktober 1997, November 1999 und September 2000 wurden landwirtschaftlich genutzte Böden mit schweren Maschinen befahren. Dabei wurden die Setzungen des Bodens an der Oberfläche sowie in verschiedenen Profiltiefen erfasst. Die Fahrzeuge waren im Juni 1997 und im September 2000 Bagger und Seitenbäume, die für das Verlegen von Gasleitungen verwendet

werden. Der Boden war in beiden Fällen abgetrocknet (Saugspannung 850 hPa im Juni 1997, 27-177 hPa im September 2000). Für die Versuche im Oktober 1997 und November 1999 stand ein voll beladener Zuckerrübenvollernter zur Verfügung. Diese Versuche fanden unter sehr feuchten Bodenverhältnissen statt (Saugspannung 32-62 hPa im Oktober 1997, 12-22 hPa im November 1999; Tab. 1 und 2).

Im Juni 1997 lag das Testfeld im Ruckfeld bei Tegerfelden (Kanton Aargau), im Oktober 1997 und November 1999 war der Teststandort bei Frauenfeld (Kanton Thurgau) und im September 2000 bei Buttisholz

Tab. 1. Kennwerte der Testböden am Tag der Befahrungen. Die angegebenen Tiefen entsprechen den Tiefen, in denen die Messdosen des LAS-Meter installiert waren¹

Feldversuch	Tiefe cm	Ton %	Schluff %	Steine %	Saugspannung hPa	Wassergehalt Vol%
1997, Raupenfahrzeuge	32	18	57	<1	850	n.b. ^a
1997, Zuckerrübenvollernter	20	18	35	<1	62	35
	40	8	25	<1	51	28
	60	8	25	<1	32	29
1999, Zuckerrübenvollernter	20	27	53	<1	9	47
	40	23	54	<1	22	41
	60	15	47	<1	7	44
2000, Raupenfahrzeug	15	n.b. ^a	n.b. ^a	n.b. ^a	177	n.b. ^a
	30	15	30	<1	56	n.b. ^a
	50	12	28	<1	27	n.b. ^a

^an.b. = nicht bestimmt; ¹Large Area Settlement-Meter (siehe Abb. 1)

Tab. 2. Eigenschaften der Fahrzeuge, die für die Überfahrten verwendet wurden

Feldversuch	Maschinentyp	Radlast kg	Kontaktfläche m ²	Mittlerer Kontakt flächendruck kPa	Anzahl Überfahrten LAS-Sonden	Anzahl Überfahrten Nivelliermarken
1997, Raupenfahrzeuge ^a	Fiat FH 300	15100	3,6	42	1	0
	Fiat Allis PL 40C	12800	2,45	51	1	0
	Cat 583	19000	2,4	78	1	0
1997, Zuckerrübenvollernter ^b	Kleine SF10	6240	0,552	113	1	1
		11230	0,708	159	1	1
1999, Zuckerrübenvollernter ^c	Kleine SF10	10885	0,591	184	4	1 und 4
2000, Raupenfahrzeug ^d	Liebherr 942	15750	2,46	64	4	4

^aaus Berli *et al.* 2000, S. 229; ^baus Friedli *et al.* 1998, S. 24, erhoben durch die Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon; ^cerhoben durch die Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon; ^derhoben durch das Institut für terrestrische Ökologie, ETH Zürich

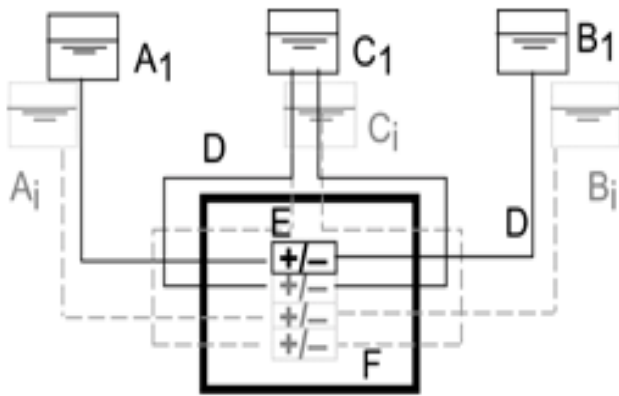


Abb. 1. Schematische Ansicht des Large Area Settlement (LAS) Meters, mit dem die Bodensetzungen in verschiedenen Profiltiefen gemessen wurden. Die Steuereinheit besitzt 12 Eingangspaare (Messkanäle). Der Differenzdruckmesser muss für jede einzelne Messung zum nächsten Messkanal umgeschaltet werden. In jeder Messtiefe wurden zwei Null Dosen eingebaut, um die Schwankungen des Differenzdruckmessers zu kontrollieren. Beide Eingänge (+/-) des Differenzdruckmessers waren mit derselben Nulldose, das heisst demselben Wasserspiegel, verbunden.

(Kanton Luzern). Obschon die Versuche an vier verschiedenen Standorten durchgeführt wurden, waren die Böden in ihrer Art vergleichbar. Es handelte sich in allen Fällen um skelettfreie Schlufflehme (Tab. 1).

Zur Messung der Setzungen in verschiedenen Profiltiefen wurde ein neu entwickeltes hydrostatisches Messsystem, das Large Area Settlement-Meter (LAS-Meter), angewendet (Meier und Ingensand 1996). Das LAS-Meter besteht aus Paaren wassergefüllter Dosen, die über Plastikschläuche mit einem Differenzdruckmesser in der Steuereinheit und einem Datalogger verbunden sind (Abb. 1). Der Differenzdruckmesser misst die Differenz der hydrostatischen Drücke zwischen den zwei Proben eines jeden Paares. Relative Änderungen der Höhenlage zweier entsprechender Proben werden als hydrostatische Druckdifferenzen erfasst. Je zwei Probenpaare wurden in Löcher, die vorgängig mit dem Bohrstock vertikal in drei verschiedene Tiefen gebohrt wurden, eingebaut. Da positive Wasserdrücke gemessen werden mussten, wurde die Zentraleinheit jeweils in einer Profiltrube, die etwa 10 cm tiefer als das tiefste Probenpaar war, platziert. Bei den Versuchen mit den Baumaschinen im Juni 1997 und September 2000 wurden die Dosen in 15, 30 und 50 cm installiert, für die Versuche mit dem Zuckerrübenvollernter im Oktober 1997 und No-

vember 1999 jeweils in 20, 40 und 60 cm.

Die Dosen hatten einen Durchmesser von 6 cm und eine Höhe von 4 cm. Die Messdosen wurden jeweils in die Spur der Testfahrzeuge eingebaut, während man die Referenzdosen in den entsprechenden Tiefen in einer Fläche vergraben hat, die während der Versuchsdauer nicht überfahren wurde.

Die Zahl der Überfahrten sowie die Radlasten waren sehr unterschiedlich. Im Juni 1997 fuhren zwei Seitenbäume und ein Bagger je einmal über die Messdosen (insgesamt 3 Überfahrten). Im Oktober 1997 gab es zwei Überfahrten mit einem Zuckerrübenvollernter, wobei die maximale Radlast (rechtes Vorderrad) für die zweite Befahrung auf 11,2 t verdoppelt wurde. Im November 1999 überfuhr derselbe Zuckerrübenvollernter die Messdosen viermal mit seinem rechten Vorderrad, das eine Radlast von knapp 11 t aufwies. Hierzu manövrierte er auf einer Strecke von etwa 2 m vorwärts und rückwärts. Im September 2000 überfuhr ein Bagger mit ungefähr 16 t Raupenlast viermal die Messdosen, wobei er beim dritten Mal eine halbe Stunde auf der Testfläche stehen blieb. Tabelle 2 gibt dazu eine Übersicht.

Die Beobachtungen der Bodenregeneration nach den Überfahrten dauerten in den Versuchen 1997 zwei Tage. Dann mussten sie wegen Lufteintritt ins Messsystem abgebrochen werden. 1999 konnte während 12 Tagen nach der Befahrung weitergemessen werden, bis die Geräte ausgebaut werden mussten, weil das Feld gepflügt wurde. Im September 2000 wurde das Monitoring während 6 Tagen weitergeführt.

Die Messgenauigkeit des LAS-Meters wurde im Labor getestet, wobei die Dosen auf einem Ge-

stell in 5, 25 und 45 cm über dem Boden befestigt waren. Die Zentraleinheit befand sich am Boden. Die einzelnen Dosen wurden abwechselungsweise auf Gegenstände von 1 beziehungsweise 2 cm Höhe gehoben und die Messwerte des LAS-Meters registriert. Es wurde eine Genauigkeit von 0,6 bis 0,8 mm an den einzelnen gemessenen Höhendifferenzen bestimmt. Für die Auswertung der Feldversuche hat man die Höhendifferenzen jeweils in Bezug zum letzten Messwert unmittelbar vor der ersten Überfahrt bestimmt. Dies führte zu einer Fehlerfortpflanzung, die ebenfalls im Labor überprüft wurde. Ein Vergleich der berechneten Höhendifferenzen mit den effektiven Sollwerten ergab eine mittlere Genauigkeit von 1,18 mm für die berechneten Höhendifferenzen.

Die Setzungen der Bodenoberfläche wurden mit einem klassischen geodätischen Nivellement erhoben. Dabei hat man jeweils Messmarken in die Spuren und in eine nicht befahrene Referenzlinie gesetzt. Als Höhenfixpunkte dienten die Oberkanten von Drainageschächten in den Versuchen mit dem Zuckerrübenvollernter. Im September 2000 wurde dafür ein Nagel in einen asphaltierten Flurweg geschlagen. Im Juni 1997 musste auf ein Nivellement verzichtet werden, weil die Raupen lange Stollen hatten und die Messmarken ausgerissen hätten. Da die Messmarken jeweils nur vor oder nach einer Überfahrt mit der Nivellierlatte zugänglich waren, konnten mit dem Nivellement nur bleibende Setzungen erfasst werden. Im November 1999 wurden mit dem Nivellement drei verschiedene Lastfälle miteinander verglichen: Eine Überfahrt, vier Überfahrten und die Stelle mit dem Manöver vorwärts und rückwärts, wo auch die Setzungen im Profil erfasst wurden.

In feuchten Böden bleiben die Setzungen

Die Auswertungen der verschiedenen Feldversuche konzentrierten sich hauptsächlich auf die bleibenden (plastischen) Deformationen, die schliesslich zu schädlichen Bodenverdichtungen führen. Tabelle 3 gibt die totalen plastischen Deformationen wieder, die in den einzelnen Versuchen erhoben wurden. Für die Versuche 1999 und 2000 sind die Mittelwerte über die gesamte Beobachtungszeit nach den Überfahrten angegeben. Es wird ersichtlich, dass bei den Versuchen mit dem Zuckerrübensvollernter, die unter feuchten Bodenverhältnissen stattgefunden hatten, wesentlich grössere Setzungen gemessen wurden als in den Versuchen mit den Raupenfahrzeugen, wo der Boden jeweils trocken war. Im ersten Versuch vom Juni 1997 mit den Raupenfahrzeugen konnten wegen Luft-eintritt ins Messsystem nur die Werte in 30 cm Tiefe ausgewertet werden. Es wurden lediglich 2 mm bleibende Setzungen registriert. Im Oktober 1997 hat man in 20 cm 43 mm, in 40 cm 28,5 mm und in 60 cm 13,5 mm bleibende Setzungen gemessen. Ähnliche Werte wurden auch im November 1999 aufgenommen (in 20 cm 30,6 mm, in 40 cm 23,2 mm und in 60 cm 23,5 mm). Im September 2000 wurden maximale plastische Deformationen von 7,8 mm in 15 cm, 6,4 mm in 30 cm und 2,4 mm in 50 cm Tiefe gemessen.

Aus Abbildung 2 geht hervor, dass sich der Boden in den 12 Tagen nach der Überfahrt im November 1999 nicht erholt hat. Die Drift der Messwerte in 20 cm Tiefe deutet keine Hebung des Bodens an, sondern ist auf das Messsystem zurückzuführen, denn die Messwerte der übrigen Tiefen zeigen eher eine umgekehrte Drift. Abbildung 3 zeigt demgegenüber für den Versuch mit dem Bagger 2000 eine kontinuierliche Aufnahme der vertikalen

Tab. 3. Mit dem LAS-Meter erhobene bleibende Bodensetzungen in verschiedenen Profiltiefen. In den Versuchen 1997 mussten die Messungen zwei Tage nach der Befahrung abgebrochen werden, weil Luft in das Messsystem eingetreten war. 1999 und 2000 dauerten die Beobachtungen noch 12 bzw. 6 Tage nach der Befahrung an. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte über die Beobachtungsperiode nach der Befahrung

Feldversuch	Anzahl Überfahrten	Tiefe cm	Totale plastische Deformation mm
1997, Raupenfahrzeuge ^a	3	30	2,0
1997, Zuckerrübensvollernter ^a	2	20	43,0
	2	40	28,5
	2	60	13,5
1999, Zuckerrübensvollernter ^b	4	20	30,6 ^a
	4	40	23,2 ^c
	4	60	23,5 ^c
2000, Raupenfahrzeug ^d	4	15	7,8 ^c
	4	30	6,4 ^c
	4	50	2,4 ^c

^aMittelwert von 2 Messdosen; ^bMittelwerte über eine Beobachtungsperiode von 12 Tagen;

^cWert einer Messung; ^dMittelwerte über eine Beobachtungsperiode von 6 Tagen

len Verformungen in 30 Tiefe (Werte eines einzigen Messkanals). Deutlich ist der hohe Anteil elastischer Deformationen, aber eine vollständige Erholung des Bodens nach den einzelnen Überfahrten tritt nicht ein.

Tabelle 4 zeigt die Setzungen der Bodenoberfläche für die Versu-

che, in denen nivelliert wurde. Die Resultate machen wiederum den Einfluss der Bodenfeuchte sowie der Anzahl Überfahrten deutlich. In der Tabelle wird unterschieden zwischen Spuren, wo die Fahrzeuge ohne Halt durchgefahren sind und den Flächen über den LAS-Meter-Messdosen, auf denen die Fahr-

Abb. 2. Mit dem LAS-Meter bestimmte, bleibende Setzungen in verschiedenen Profiltiefen nach vier Überfahrten mit dem rechten Vorderrad des Zuckerrübensvollernters im November 1999. Die Höhendifferenzen wurden bezüglich dem Messwert unmittelbar vor der Befahrung berechnet. Die Datenreihen geben jeweils die Resultate eines Messkanals wieder.

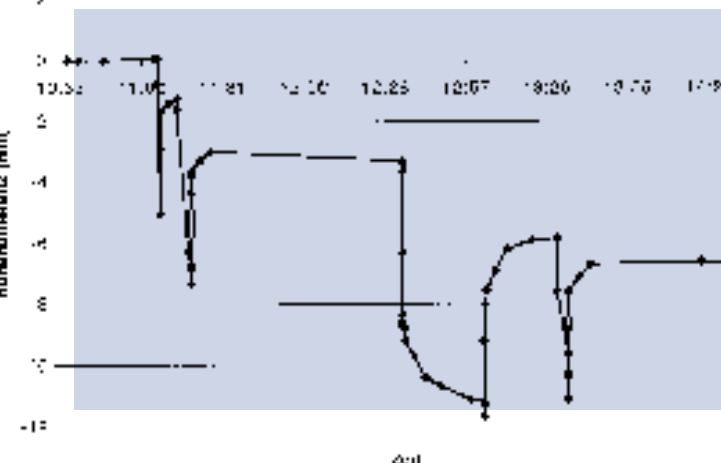
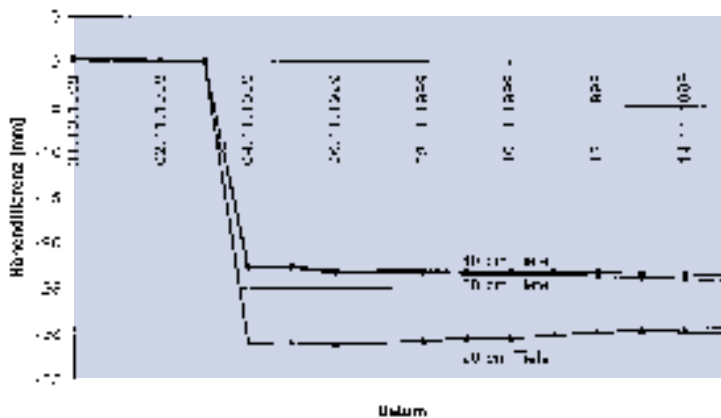


Abb. 3. Kontinuierliche Messung der Setzungen in 30 cm Tiefe während der Überfahrten mit dem Bagger im September 2000. Während die erste Überfahrt ohne Stillstand durchgeführt wurde, hielt der Bagger bei der zweiten und vierten Überfahrt etwa 3 Min. an. Bei der dritten Überfahrt blieb der Bagger 30 Min. stehen. Die absoluten Werte der Setzungen sind wesentlich kleiner als im November 1999. Deutlich erkennbar ist zudem der hohe Anteil an elastischer Deformation. Dennoch erreichte der Boden sein Ausgangsniveau nach keiner Überfahrt wieder.

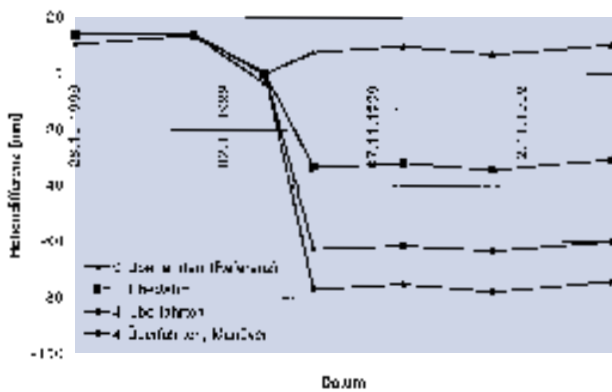


Abb. 4. Mittels Nivellement bestimmte, bleibende Setzungen der Bodenoberfläche nach den Überfahrten mit dem Zuckerrübensvollernter im November 1999.

Die Höhendifferenzen wurden bezüglich dem Messwert unmittelbar vor der Befahrung berechnet. Die Datenreihen geben jeweils die Mittelwerte aus 5 beziehungsweise 4 (in der Fläche mit dem Manöver) Messpunkten pro Tag wieder. Da der Höhenfixpunkt ein Drainageschacht war, stellt das Diagramm die absoluten Bewegungen der Bodenoberfläche infolge Quellen, Schrumpfen und Befahren dar. Während der ganzen Messperiode wurde keine mechanische Erholung des Bodens von der Befahrung beobachtet. Der Effekt des Manövers über den LAS-Dosen zeigt sich in einer grösseren Setzung als in der Spur mit vier Überfahrten ohne Manöver.

zeuge während mindestens 2 Minuten stillstanden, damit in allen Messkanälen des LAS-Meters gemessen werden konnte. Der Stillstand beziehungsweise das Manöver des Zuckerrübensvollernters im November 1999 führte zu grösseren Setzungen. Abbildung 4 zeigt die Resultate der Nivellements in den verschiedenen Fahrspuren im November 1999. Da der Höhenfixpunkt ein Drainageschacht war, können die Messwerte als absolute Deformationen, die durch Quellen, Schrumpfen und Befahren bedingt sind, interpretiert werden. Deutlich ist der Effekt der mehrfachen Befahrung, besonders des Manövers auf einer kleinen Fläche.

Kann sich der Boden von Verdichtungen erholen?

Aus den vorliegenden Resultaten geht die Bedeutung der Bodenfeuchte für das Ausmass plastischer Verformungen deutlich hervor. Die Befahrung eines feuchten Bodens mit schweren Maschinen hat bis in 60 cm Tiefe Setzungen von über 1 bis 2 cm

hervorgerufen, die während der ganzen Beobachtungszeit nicht zurückgegangen sind. Um Bodenverdichtungen zu vermeiden, sollten bei der Bodenbewirtschaftung solche heiklen Bodenzustände besonders beachtet werden. Zudem sollten mehrfache Befahrungen vermieden werden. Besonders Manöver zum Wenden der Fahrzeuge am Ende der Schläge sollten nur auf befestigten Flurwegen durchgeführt werden.

Es stellt sich allerdings die Frage, ob das Bodenökosystem nicht doch auf lange Sicht in der Lage ist, auch plastische Verformungen rückgängig zu machen. Die natürlichen Regenerationsfaktoren Quellen, Schrumpfen, Frostgare, Durchwurzelung und Bioturbation durch Bodentiere lassen sich, im Gegensatz zum Verdichtungsprozess, mit mechanischen Modellen allein nicht beschreiben. Sie können sich aber mechanisch auswirken, indem sie das Niveau des verformten Bodens wieder anheben. In den eher kurzen Beobachtungszeiträumen der beschriebenen Feldversuche konnte die mechanische Wirkung der natürlichen Regeneration nicht erfasst werden. Mit den vorgestellten Messmethoden liess sich grundsätzlich aber auch ein langfristiges Monitoring der vertikalen Bodenverformung über mehrere Monate bis Jahre einrichten. So eine Langzeitbeobachtung mit Setzungsmessung im Profil und an der Bodenober-

fläche kann zur Prüfung der Effizienz der natürlichen Regenerationsfaktoren einen wesentlichen Beitrag leisten.

Dank

Die Autorin dankt M. Berli vom Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich sowie M. Gysi von der Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik, Tänikon, für die Möglichkeit, die genannten Feldversuche im Rahmen der Versuche von M. Berli und M. Gysi durchführen zu können. Für die finanzielle Unterstützung sei den Bodenschutzfachstellen der Kantone Bern, Solothurn, Luzern und Basel-Landschaft sowie der Sektion Agrarwirtschaft und Ökologie im Finanzdepartement des Kantons Aargau gedankt. Das LAS-Meter wurde von der Firma Edi Meier und Partner in Winterthur in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich entwickelt.

Literatur

- Arvidsson J., Trautner A., van den Akker J. J. H. und Sjöberg E., 2000. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters. II. A model to prevent subsoil compaction. In: «Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Community» (Hrsg. Arvidsson J., van den Akker J.J.H. und Horn R.), pp. 99-107. Proceedings of the 3rd workshop of the Concerted Action 14-16 June 2000, Uppsala.
- Berli M., Kulli B., Attinger W. und Schulin R., 2000. Subsoil compaction of agricultural land by heavy construction machinery - soil mechanical aspects. In: Subsoil compaction (Hrsg. Horn R., van den Akker J. J. H. and Arvidsson J.). *Advances in Geology* 32, pp. 226-232.
- Diserens E., Anken T., Weisskopf P. und Zihlmann U., 1998. Tragen Unterböden grössere Lasten als erwartet? *Agrarforschung* 5, 9-12.
- Friedli B., Tobias S. und Fritsch M. 1998. Entwicklung von Gefüge

Tab. 4. Bleibende Setzungen der Bodenoberfläche, die mittels Nivellement erhoben wurden. Es sind jeweils die Mittelwerte über die Beobachtungszeiträume nach den Befahrungen angegeben. Im Juni 1997 wurde kein Nivellement durchgeführt.

Feldversuch	Plastische Setzungen der Bodenoberfläche mm			
	0 Überfahrten (Referenz)	1 Überfahrt	2 oder 4 Überfahrten	2 oder 4 Überfahrten mit Halt über LAS-Dosen
1997, Zuckerrübensvollernter	n.b. ^a	17,3	56,3 ^b	75,6 ^b
1999, Zuckerrübensvollernter	-8,7	31,7	61,9 ^c	76,1 ^c
2000, Raupenfahrzeug	-0,5	n.b. ^a	10,5 ^b	17,4 ^c

^an.b.= nicht bestimmt; ^b2 Überfahrten; ^c4 Überfahrten

und Tragfähigkeit rekultivierter Böden. Versuche zur mechanischen Belastbarkeit von Böden und zu den entsprechenden Erhebungsmethoden. Zwischenbericht über die Untersuchungen in der Periode 1997 zuhanden der Kantone Aargau und Bern. 51 pp.

■ Gysi M., Ott. A. and Flühler H., 1999. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* **52**, 141-151.

■ Horn R., Domzal H., Slowinska-Jurkiewicz A. and van Ouwerkerk

C., 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research* **35**, 23-36.

■ Horn R. and Rostek J., 2000. Subsoil compaction processes - state of knowledge. In: Subsoil compaction (Hrsg. Horn R., van den Akker J.J.H. und Arvidsson J.). *Advances in GeoEcology* **32**, pp. 44-54.

■ Kulli B., Berli M., Gysi M., Schulz R. and Flühler H., 2000. Subsoil compaction on agricultural land by heavy construction machinery - soil physical aspects. In: Subsoil compac-

tion (Hrsg. Horn R., van den Akker J.J.H. und Arvidsson J.). *Advances in GeoEcology* **32**, pp. 278-283.

■ Meier E. und Ingensand H., 1996. Ein neuartiges hydrostatisches Messsystem für permanente Deformationsmessungen. Tagungspubl. XII. Internat. Kurs für Ingenieurvermessung 9. - 14. 9. 96, A8/1-A8/12, Graz.

■ Sommer C. and Hartge K.-H., 1991. Verdichtung und Befahrbarkeit von Ackerböden - Probleme und Auswege. Ber. über Landwirtschaft., *Zeitschr. f. Agrarpolitik u. Landwirtsch.* **204**, 104-117.

RÉSUMÉ

Prudence en roulant sur des sols humides: tassements persistants!

La Loi Fédérale sur la Protection de l'Environnement révisée prescrit la protection du sol contre les atteintes physiques telles que la compaction. Or la mise en oeuvre de la protection physique du sol provoque des conflits, surtout pour l'agriculture qui se sert de machines efficaces, mais lourdes, pour une exploitation économique.

La compaction du sol est provoquée par des compressions et cisaillements irréversibles, c'est à dire par des déformations plastiques. Cette contribution présente les résultats de quatre essais en champs, où la déformation verticale du sol a été déterminée par nivellement. Un nivellement géodésique a été effectué sur la surface du sol. Des mesures de niveaux à l'intérieur du profil du sol ont été réalisés à différentes profondeurs à l'aide d'un nouveau système hydrostatique. Dans deux essais, des pelles mécaniques ont roulé sur un sol sec. Dans les deux autres essais, des récolteuses de betteraves sucrières sont passées sur un sol humide. Dans le sol sec, les déformations élastiques ont dominé alors que les tassements persistants dans les couches plus profondes étaient limités à quelques millimètres (6 mm à une profondeur de 30 cm et 2 mm à une profondeur de 50 cm au maximum). En revanche, dans le sol humide, des tassements persistants de 14 à 24 mm ont été mesurés même à une profondeur de 60 cm. Ces tassements diminuaient depuis la surface du sol jusqu'aux couches les plus profondes. La déformation a persisté pendant toute la période des observations, qui a duré 12 jours au maximum. L'effet des passages multiples des véhicules a de plus été étudié au moyen du nivellement superficiel: quatre passages provoquaient des tassements deux fois plus grands qu'un seul passage. Ces tassements ont persisté pendant toute la période de l'expérience.

Ces tests permettent de conclure que ce système de mesures est une méthode prometteuse de surveillance à long terme d'une éventuelle régénération mécanique du sol.

SUMMARY

Caution on wet soils: trafficking can cause persistent subsidences!

The revised Federal Act on Environment Protection prescribes soil protection from physical damage, such as compaction. However, practical implementation of physical soil protection provokes conflicts, particularly for agriculture where efficient, but heavy, machinery is used for the sake of economic management.

Soil compaction is caused by irreversible compression and shearing, i.e. plastic deformation. This contribution shows the results of four field tests where vertical soil displacement was assessed *in situ* with combined geodetic levelling on the soil surface and a new hydrostatic levelling system in different depths of the soil profile. In two field tests, excavators trafficked dry soil, in the other two experiments, sugar beet harvesters passed over wet soil. In the dry soil, elastic deformation dominated, plastic subsidence in deeper layers was only a few millimetres (max. 6 mm in 30 cm and 2 mm in 50 cm). In the contrary, in the wet soil, subsidence of 14 to 24 mm was measured even in 60 cm depth. The amount of settlement decreased from the soil surface to deeper layers. However, deformation was persistent during the whole monitoring period, which took 12 days at maximum. Additionally, the effect of multiple passes was tested with surface levelling. Four passes caused almost double sinkage than one single pass. This deformation was persistent for the whole monitoring time, too.

After these field tests, it can be concluded that the measuring system has a great potential for long-term monitoring of an eventual mechanical resilience of the soil.

Key words: displacement measurement, soil compaction, field experiment