

# Umwelt

## Setzungsmessungen bei der Befahrung rekultivierter Böden

Silvia Tobias<sup>1</sup>, Matthias Stettler<sup>2</sup>, Maja Haberecht<sup>3</sup>, Martin Meyer<sup>2</sup> und Hilmar Ingensand<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), CH-8903 Birmensdorf

<sup>2</sup>Schweiz. Hochschule für Landwirtschaft SHL, CH-3052 Zollikofen

<sup>3</sup>Institut für Geodäsie und Photogrammetrie ETH-Zürich, 8093 Zürich

Auskünfte: Silvia Tobias, E-Mail: [silvia.tobias@wsl.ch](mailto:silvia.tobias@wsl.ch), Tel. +41 44 739 23 49

### Zusammenfassung

**V**erbesserte Rekultivierungstechniken ergeben locker geschüttete Böden, die während einigen Jahren nur extensiv landwirtschaftlich bewirtschaftet werden dürfen. Wir untersuchten den Einfluss des Alters rekultivierter Böden auf ihre mechanische Belastbarkeit sowie die Fähigkeit der Böden zur Erholung von mechanischen Belastungen. Dazu führten wir Befahrungsexperimente mit einem Traktor und Güllefass auf zwei Rekultivierungen, die drei beziehungsweise ein Jahr davor geschüttet worden waren, durch. Wir bestimmten die vertikalen Deformationen mit einem Nivellement an der Bodenoberfläche und mit einem speziell entwickelten hydrostatischen Setzungsmessgerät im Bodenprofil in ca. 28 cm Tiefe. Wir massen nach der Befahrung Setzungen an der Bodenoberfläche von ca. 11 mm und im Bodenprofil von ca. 6 mm. Die Setzungen gingen sowohl an der Bodenoberfläche als auch im Profil innerhalb von knapp drei Wochen wieder zurück. Dabei gingen sie unabhängig vom Alter der Rekultivierungen in gleichem Mass zurück. Allerdings erreichten die Fahrspuren nicht mehr die Höhe, die der unbefahrene Boden bis zum Ende der Beobachtungszeit eingenommen hatte.

Die Rekultivierung von Böden nach Materialabbau oder Grossbaustellen ist eine wichtige Massnahme zur langfristigen Erhaltung der landwirtschaftlichen Nutzfläche, insbesondere der Fruchtfolgeflächen (FFF). Während in der Vergangenheit der Rekultivierungsvorgang zu starken Bodenverdichtungen führte (Hossner 1988; Friedli *et al.* 1998), sind heute rekultivierte Böden dank der verbesserten Schüttetechniken eher überlockert und daher verdichtungsempfindlich (Schäffer *et al.* 2007). Die heutigen Rekultivierungsrichtlinien schreiben deshalb eine extensive Folgebewirtschaftung während fünf

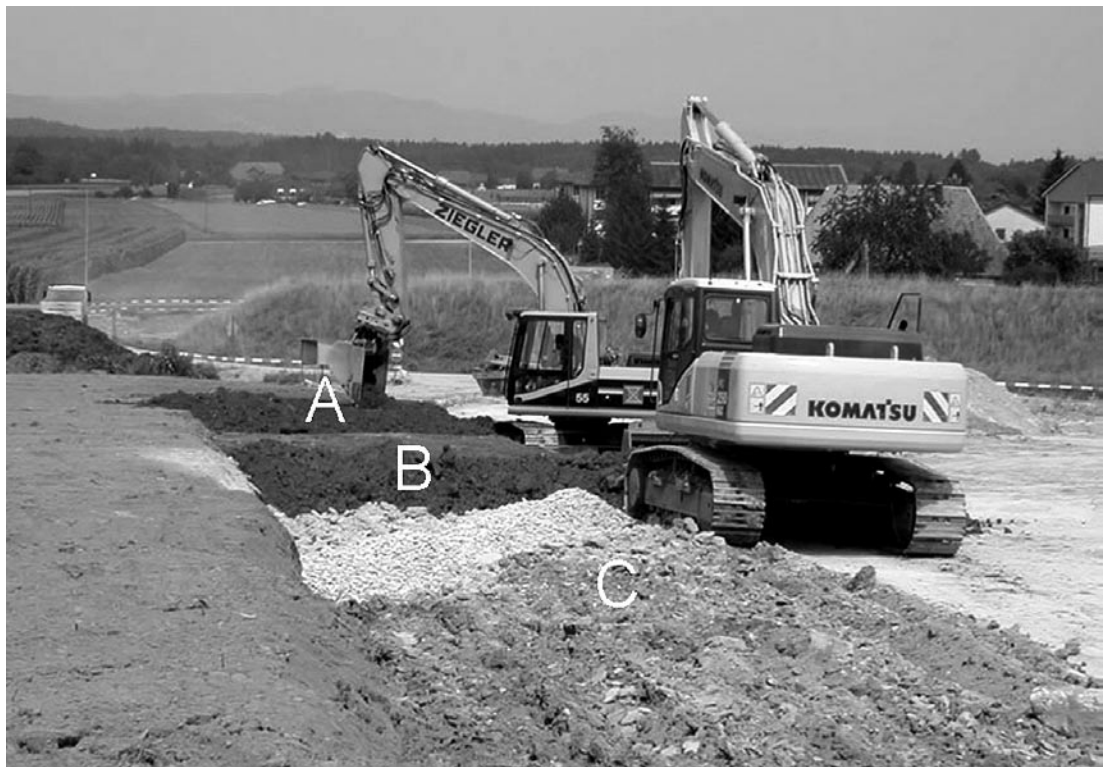


Abb. 1. Streifenweise Rekultivierung der Ackerböden auf der Tunnelausbruch-Deponie Schacht bei Wanzwil (BE): A=Oberboden; B=Unterboden; C=Rohplanie mit Kiesstreifen zur Drainage auf der Höhe der Baggerrampe. (Foto: M. Stettler)



Abb. 2. Die für die Befahrung verwendeten Fahrzeuge. (Foto: M. Stettler)

Jahren vor (FSK 2001). Es stellt sich die Frage, ob das Problem der Bodenverdichtung auf Rekultivierungen dank der verbesserten Rekultivierungstechniken effektiv gelöst werden konnte, oder ob es auf einen späteren Zeitpunkt verschoben wurde, nämlich dann wenn der Boden in die ortsübliche, mechanisierte landwirtschaftliche Nutzung übergeführt wird.

Tobias *et al.* (2001) entwickelten eine Methode zur Erfassung der vertikalen Bodenbewegungen bei Befahrung mittels eines hydrostatischen Messgeräts an denselben Punkten im Bodenprofil über mehrere Tage hinweg (siehe auch Tobias 2001). Damit kann der Prozess sowie ein allfälliger Rückgang von Bodenverdichtungen beobachtet

werden. Nach diesem Ansatz lassen wir die vertikalen Bodenbewegungen in den hier beschriebenen Befahrungsexperimenten, wobei auch das Messgerät für eine langfristige Stabilität der Messwerte weiterentwickelt wurde.

### Befahrungsexperiment mit Traktor und Güllefass

Wir führten ein Feldexperiment auf zwei unmittelbar benachbarten rekultivierten Flächen unterschiedlichen Alters durch. Es handelte sich dabei um Rekultivierungen auf einer Tunnelausbruchdeponie infolge des Baus des Oezenbergtunnels für die Bahn 2000, der im Raum Wanzwil–Herzogenbuchsee (BE) erstellt wurde. Das Kulturland wurde auf 18 ha in den Jahren 2000 bis 2005 rekultiviert (Abb. 1).

Der ursprüngliche Boden war eine landwirtschaftlich intensiv genutzte Braunerde.

Unsere Testflächen wurden in den Jahren 2002 bzw. 2004 geschüttet und wiesen einen Unterboden von ca. 80 cm sowie einen Oberboden von ca. 35 cm Mächtigkeit auf. Aus technischen Gründen beschränkten wir uns bei unseren Experimenten auf Messungen im Oberboden. Dieser bestand auf beiden Rekultivierungen knapp zur Hälfte aus Sand, zu ca. einem Drittel aus Schluff und zu ca. einem Sechstel aus Ton.

Als Testfahrzeuge verwendeten wir einen Steyr 8075 Traktor (55 kW) mit einem angehängten, vollen 4000 Liter Druckfass (Abb. 2). Der Traktor war an der

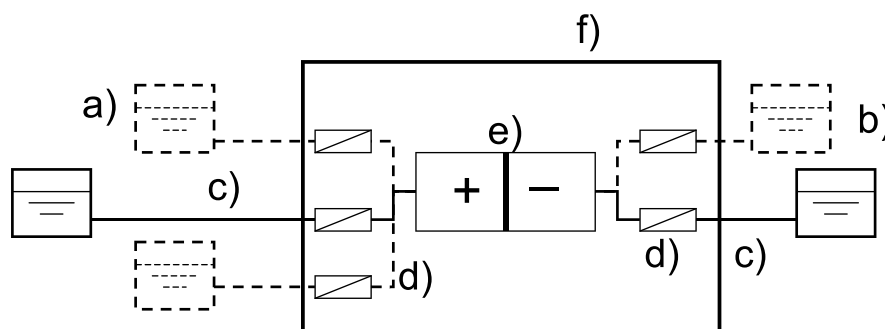


Abb. 3. Prinzip des hydrostatischen Setzungsmessgeräts HSDM: (a) Messdosen; (b) Referenzdosen; (c) Teflon Schläuche, gefüllt mit Silikonöl als Messflüssigkeit; (d) Steuerventile; (e) Differenzdruckmesser; (f) Steuereinheit. Die aktive Messlinie (Verbindung von Mess- und Referenzdose) ist mit ausgezogenen Linien gekennzeichnet.

Vorderachse einfach und an der Hinterachse doppelt bereift. Das einachsige Druckfass wies Einzelräder auf. Trotz unterschiedlichen Radlasten wurde unter allen Rädern derselbe Kontaktflächendruck von ca. 100 kPa erfasst. Die Fahrzeuge entsprachen der ortsüblichen Mechanisierung der Landwirte, denn wir wollten keine extremen Belastungen erzielen, sondern eine typische Praxissituation nachbilden.

Die Befahrung fand im Spätherbst (25. Nov. 2005) statt. Wir fuhren viermal hintereinander in denselben Spuren. Anschließend beobachteten wir die vertikalen Bodenbewegungen während drei Monaten (d.h. bis zum 28. Feb. 2006). Wir wählten für unser Experiment die Winterzeit, um allfällige Einflüsse von Frost zu entdecken.

Die Deformationen im Bodenprofil wurden mit einem «hyd-

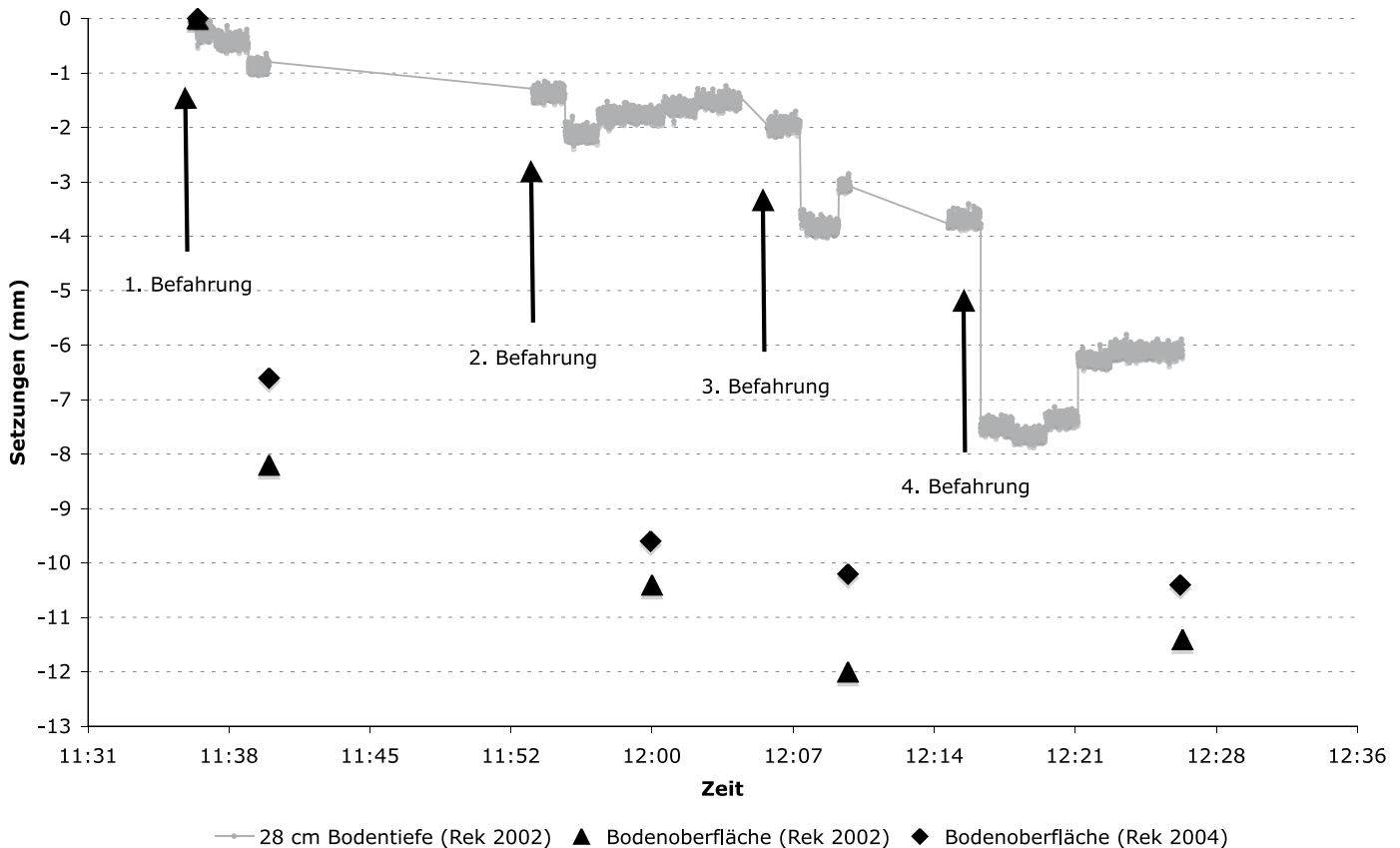
rostatic soil displacement meter» (HSDM) erfasst (Abb. 3). Dieses besteht im Wesentlichen aus verschiedenen Messdosenpaaren, die mit Flüssigkeit gefüllt und über Schläuche und einen Differenzdrucksensor miteinander verbunden sind. Das Messprinzip baut auf dem Prinzip der kommunizierenden Röhren auf, wobei beim HSDM die Flüssigkeitssäulen in den einzelnen Messdosen und Schläuchen der Messdosenpaare durch einen Differenzdrucksensor voneinander getrennt sind. Somit führt die Höhenänderung einer Messdose nicht zum Flüssigkeitsausgleich in der anderen Messdose, sondern zu unterschiedlichen hydrostatischen Drücken auf beiden Seiten des Differenzdrucksensors.

Unser HSDM bestand aus 14 Messdosen, wovon wir zwei als Referenzdosen, die sich in ihrer Höhenlage nicht veränderten, definierten und zwölf als eigentli-

che Messdosen im Boden vergraben. Wir setzten die Messdosen im Oberboden in ca. 28 cm Tiefe. Dabei bildeten wir vier Gruppen zu je drei Messdosen, wovon wir auf beiden Rekultivierungen je eine Gruppe in einer Fahrspur und die andere Gruppe in einer unbefahrenen Linie nahe der Fahrspur platzierten.

Die Bewegungen der Bodenoberfläche wurden mit einem Präzisionsnivellier erfasst. Als Messmarken im Boden benutzten wir Bodennägel mit einem Stift von 10 cm Länge und einem kreisrunden, ebenen Kopf von 10 cm Durchmesser. Es wurden je fünf Messmarken in die zweite Fahrspur, in der sich keine HSDM-Messsonden befanden, eingelegt. Weitere je fünf Messmarken wurden auf den beiden Rekultivierungen als Vergleichspunkte, die nicht befahren wurden, nahe den nicht befahrenen HSDM-Sonden eingebaut. Als Referenzpunkt für

**Abb. 4. Setzungen des Bodens, die sich bei den vier Überfahrten ergaben. Die Pfeile deuten jeweils den ungefähren Startzeitpunkt der Überfahrten an.**



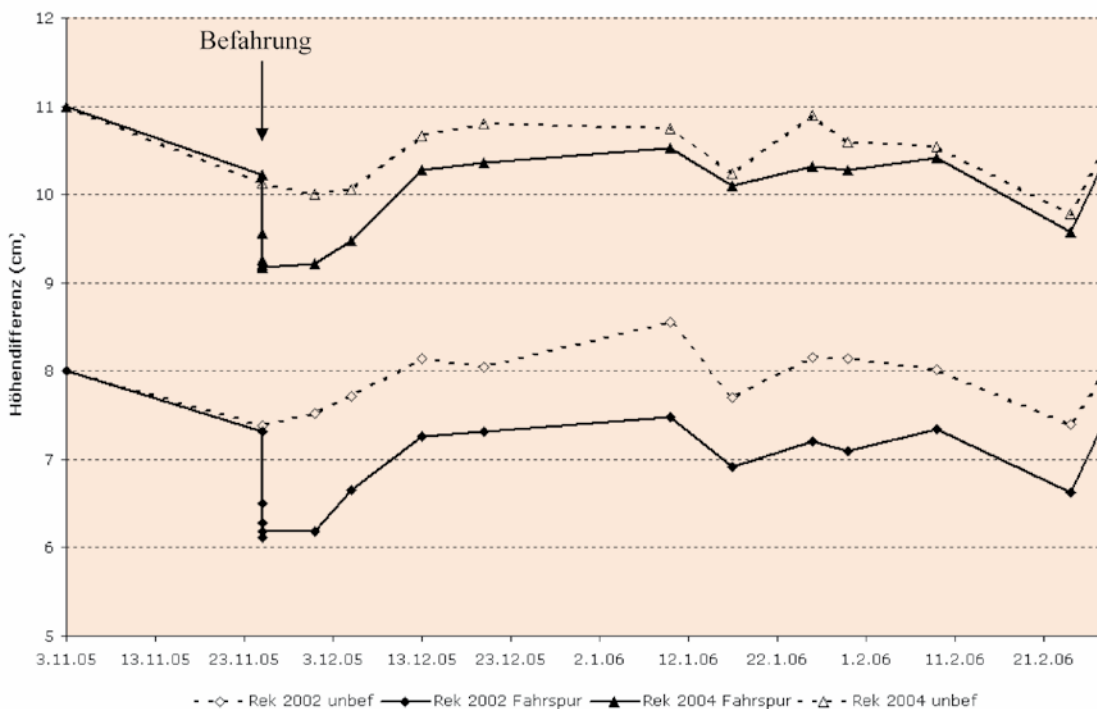


Abb. 5. Mit dem Nivellement erfasste Höhenänderungen der Bodenoberfläche in cm auf beiden Rekultivierungen vom Tag des Versuchsaufbaus (3.11.05) bis Versuchsende (28.2.06).

das Nivellement brachten wir einen Bolzen an einem Findling an, der sich ca. 30 m vom Versuchsgelände entfernt an einem befestigten Flurweg befand.

Als Vergleichsmessungen bestimmten wir stichprobenhaft die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte und Luftkapazität. Dazu entnahmen wir Bodenproben auf beiden Rekultivierungen sowohl in der Fahrspur als auch auf einer unbefahrenen Fläche, und zwar am Tag der Befahrung und am Ende des Experimentes. Zudem bezogen wir von der Meteostation Liebefeld (BE) die Daten zu Niederschlag, Lufttemperatur und Bodentemperatur in 5 cm Tiefe für die Beobachtungsperiode, um die erfassten Bodenbewegungen interpretieren zu können.

### Bodensetzungen sind teilweise reversibel

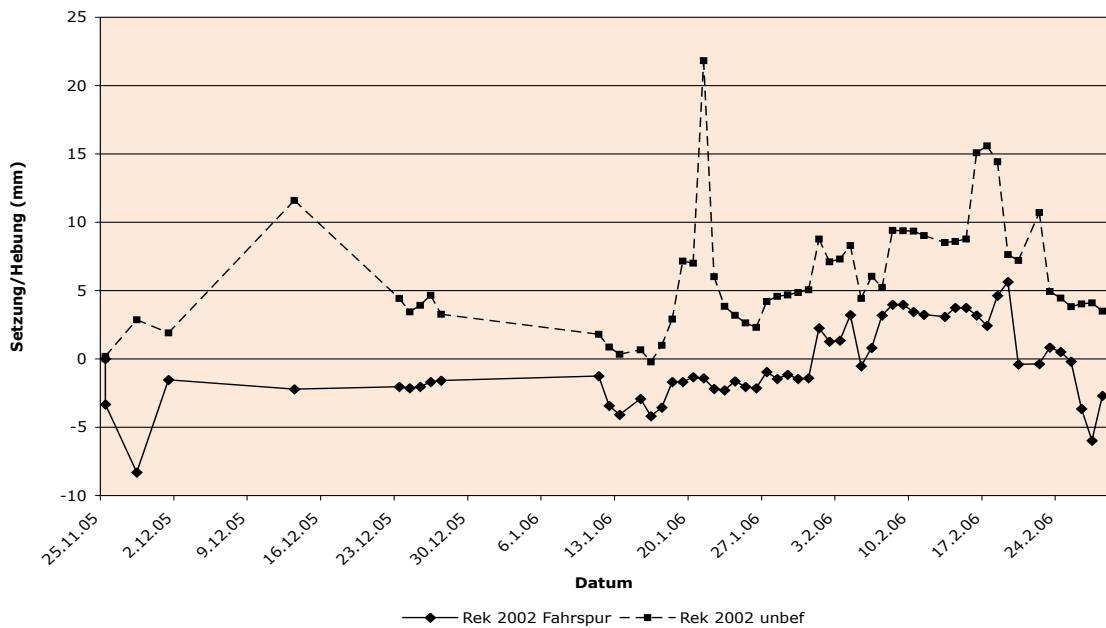
Abbildung 4 zeigt für die Rekultivierung von 2002 die Setzungen des Bodens, die sich aus den Befahrungen ergaben. Angegeben sind die Werte konti-

nuierlicher Messungen mit einer einzigen HSDM-Messdose. Der Messvorgang des HSDM musste nach jeder Überfahrt unterbrochen werden, um die Daten zu übertragen. Dies ist in der Abbildung an den nicht vertikalen Verbindungsgeraden erkennbar. Jede wiederholte Befahrung verstärkt die Bodensetzung, obgleich die Auflast der Fahrzeuge dieselbe blieb. Für das Nivellement gibt jeder Punkt den Mittelwert über die fünf Messmarken in der jeweiligen Spur an. An der Bodenoberfläche konnte jeweils erst nach Entfernen der Fahrzeuge gemessen werden, weshalb das Nivellement nur die bleibenden Setzungen der Bodenoberfläche wiedergeben konnte. Demgegenüber konnte mit dem HSDM kontinuierlich während den Überfahrten gemessen werden, so dass auch elastische Deformationen, die nach Entfernen der Auflast zurückgehen, erfasst werden konnten. Trotz unterschiedlicher Radlasten sind in Abbildung 4 die Effekte der einzelnen Räder nicht erkennbar. Dies kann damit zu-

sammenhängen, dass alle Räder denselben Kontaktflächendruck aufwiesen. Am Ende der Befahrungen verzeichneten wir an der Bodenoberfläche bleibende Setzungen von ca. 11 mm auf beiden Rekultivierungen und in ca. 28 cm Bodentiefe solche von ca. 6 mm. Diese Setzungen sind relativ gering, was sich mit dem tiefen Kontaktflächendruck der Fahrzeuge begründen lässt.

Die weitere Beobachtung ergab, dass die eigentlichen Setzungen an der Bodenoberfläche auf beiden Rekultivierungen, unabhängig von ihrem Alter, nach ca. 18 Tagen (13.12.05) zurückgingen (Abb. 5). Jeder Punkt in Abbildung 5 entspricht dem Mittel aus den Messungen an fünf Messmarken. Im Anschluss bewegte sich die Bodenoberfläche in der Fahrspur jeweils parallel zur unbefahrenen Oberfläche. Im Vergleich zu den unbefahrenen Flächen verbleiben die Fahrspuren jedoch auf einem tieferen Niveau, insbesondere auf der Rekultivierung von 2002. Somit lassen sich die Fahrspuren trotz des

Abb. 6. Mit dem HSDM erfasste Höhenänderungen in mm auf der Rekultivierung 2002 in ca. 28 cm Tiefe, vom Tag der Befahrung (25.11.05) bis Versuchsende (28.2.06).



allgemeinen Anschwellens des Bodens weiterhin nachweisen.

Wie Abbildung 6 für die Rekultivierung von 2002 zeigt, gingen auch im Bodenprofil die Setzungen zurück. Jeder Punkt entspricht dem Mittel der Messungen an drei Messdosen. Das ursprüngliche Niveau der Fahrspur wurde bereits um den 1.12.05 beinahe wieder erreicht. Doch zeigt sich auch für die Messungen im Bodenprofil ein systematischer Höhenunterschied zwischen der Fahrspur und der unbefahrenen Fläche. Auf der unbefahrenen Fläche gibt es zwei Ausreisser, die sich nicht erklären lassen, am 13.12.05 und am 21.1.06.

Der Vergleich mit den Meteorodaten zeigt, dass die Hebungen sowohl an der Bodenoberfläche als auch im Profil jeweils nach Niederschlagsereignissen stattfanden, was sich für das HSDM in der zweiten Hälfte der Beobachtungsperiode wesentlich besser nachvollziehen lässt, da es mehr Daten lieferte als das Nivellement. Somit lässt sich also das Quellen und Schrumpfen der Bodenteilchen mit Deformati-

onmessungen erfassen. Umgekehrt lässt sich der Einfluss von Frost in 28 cm Tiefe mit hoher Wahrscheinlichkeit ausschliessen. Die Bodentemperatur sank in 5 cm Tiefe erst Mitte Januar 06 auf den Gefrierpunkt und fiel bis Ende Februar kaum darunter.

Die Bodenanalysen ergaben grosse Streuungen der Messwerte für die einzelnen Bodenzylinderproben (100 ml), was u.a. auf Probleme bei der Probenentnahme wegen des hohen Steingehalts der Rekultivierungen zurückzuführen ist. Im Grossen und Ganzen wiesen die Messungen auf einen locker gelagerten und gut durchlüfteten Boden hin. Für die Rekultivierung von 2004 konnte keine Veränderung der Lagerungsdichte oder der Luftkapazität infolge der Befahrungen festgestellt werden. Für die Rekultivierung von 2002 liessen sich eine Verringerung der Luftkapazität und eine entsprechende Erhöhung der Lagerungsdichte, die in den kritischen Bereich von Bodenverdichtungen fallen, infolge der Befahrungen vermuten. Allerdings massen wir am Ende der Beobachtungszeit im unbefahrenen Boden dieser Re-

kultivierung dieselben ungünstigen Werte wie in der Fahrspur. Unsere Stichprobe war zu klein, um die hohe räumliche Variabilität physikalischer Bodenparameter auf Rekultivierungen hinreichend zu erfassen.

### Schonzeit für Rekultivierungen wichtig

Unsere Befahrungsexperimente ergaben eher als geringe einzustufende Bodensetzungen und die Setzungen in den Fahrspuren gingen auf das ursprüngliche geodätische Niveau zum Zeitpunkt vor der Befahrung zurück. Dennoch erreichten die Fahrspuren bis zum Ende der Beobachtungszeit nicht mehr dieselbe absolute Höhe, die die unbefahrenen Flächen im Versuchsverlauf eingenommen hatten. Dieser Niveauunterschied zwischen Fahrspur und unbefahrener Fläche zeigt sich auch im Bodenprofil. Überraschender Weise ist er auf der älteren Rekultivierung grösser als auf der jüngeren, was mit dem Zustand des Bodens beim Rekultivierungsprozess zusammenhängen kann.

Obwohl unsere Messungen keine abschliessenden Aussagen

zur Verdichtungsgefahr rekultivierter Böden zulassen, empfehlen wir im Sinne eines vorsorglichen Bodenschutzes die Vorgaben der Rekultivierungsrichtlinien (FSK 2001) bezüglich der angegebenen Schonfrist weiterhin streng einzuhalten. Die Forschung auf diesem Gebiet ist unbedingt weiter zu führen, denn die fortschreitende Bautätigkeit zieht zunehmend die besten Landwirtschaftsböden in Mitleidenschaft. Die Rekultivierung von Kulturland wird deshalb weiter an Bedeutung gewinnen.

### Literatur

- Hossner L.R., 1988. Reclamation of surface-mined lands. 1 and 2, CRC Press Inc. Boca Raton, Florida.
- Friedli B., Tobias S. & Fritsch M., 1998. Quality assessment of restored soils: combination of classical soil science methods with ground penetrating radar and near infrared aerial photography? *Soil and Tillage Research* **46**, 103-115.
- FSK Schweiz. Fachverband für Sand und Kies (Hrsg.), 2001. Kulturland und Kiesabbau. Richtlinie für den fachgerechten Umgang mit Böden. Bern.
- Schäffer B., Attinger W. & Schulin R., 2007. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery – Soil physical and mechanical aspects. *Soil and Tillage Research* **93**, 28-43.
- Tobias S., Hennes M., Meier E. & Schulin R., 2001. Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels. *Soil Use and Management* **17**, 229-234.
- Tobias S., 2001. Vorsicht beim Befahren feuchter Böden: Bleibende Setzungen drohen! *Agrarforschung* **8**(2), 60-65.

### RÉSUMÉ

#### Mesure du tassement occasionné par le passage de véhicules sur des sols reconstitués

L'amélioration des techniques de reconstitution (restauration des sols) permet d'obtenir des sols de remblai légers, qui doivent être utilisés pendant quelques années pour une agriculture uniquement extensive. Nous avons étudié l'influence de l'âge du sol reconstitué sur sa tolérance au tassement, ainsi que sa capacité de récupération après des charges mécaniques. Dans cet objectif, nous avons effectué des essais de passages avec un tracteur et une remorque de lisier sur deux sols recultivés, l'un ayant été remblayé un an auparavant, l'autre trois ans plus tôt. Nous avons déterminé les déformations verticales à l'aide d'un nivellement géodésique en surface et avec un instrument hydrostatique développé spécialement pour mesurer le tassement dans le sol à une profondeur de 28 cm. Après les passages, les tassements mesurés étaient d'environ 11 mm à la surface du sol et d'environ 6 mm dans le profil. Tant à la surface du sol qu'en profondeur, les tassements se sont ensuite résorbés dans l'espace de trois semaines, ceci pour les deux sols reconstitués, indépendamment de l'âge du remblai. Les traces des passages n'ont cependant pas complètement disparu, le sol n'ayant plus atteint le niveau du sol de référence sans passage jusqu'à la fin des observations.

### SUMMARY

#### Measuring soil displacement due to passing over restored soils

The improved techniques of land restoration provide loose soils that have subsequently to be treated with extensive agricultural management for several years. We investigated the influence of the age of restored soils on their mechanical bearing capacity and their potential to recover from mechanical impacts. For this, we accomplished wheeling experiments with a tractor and a manure trailer on two restored soils, which had been heaped three and one year before, respectively. We ascertained the vertical soil displacement at the soil surface with digital levelling and in the soil profile at ca. 28 cm depth with a particularly developed hydrostatic soil displacement meter. After the wheeling, we determined soil subsidence of ca. 11 mm at the soil surface and of ca. 6 mm in 28 cm depth. Soil displacement reformed within less than three weeks at the soil surface as well as within the soil profile. Additionally, both restorations showed the same recovering from soil displacement independently of their ages. However, the soil in the tracks did not reach the same height, to which the soil with no wheeling had elevated until the end of the observation period.

**Key words:** land restoration, soil compaction, wheeling experiment, soil displacement