

Rekultivierungen im Vergleich mit natürlich gewachsenen Böden

Matthias Stettler^{1,2}, Christoph Stettler¹ und Beat Huber-Eicher²

¹Geotechnisches Institut AG, 3007 Bern

²Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft SHL, 3052 Zollikofen

Auskünfte: Matthias Stettler, E-Mail: matthias.stettler@geo-online.com, Tel. +41 (0)78 622 12 89



Foto: Matthias Stettler, 2005

Schüttung des Oberbodens auf den vorbereiteten Unterboden.

Einleitung

Die Untersuchung erfolgte im Rahmen der bodenkundlichen Baubegleitung der SBB-Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist (NBS). Ein beträchtlicher Teil der zwischen 1995 und 2004 erstellten Bahnlinie verläuft in engen Einschnitten und Tunnels, um Auflagen wie Landschaftschutz und Erhaltung der Bodenressourcen Rechnung zu tragen. Die Beanspruchung des Kulturlandes für Installationsplätze, Lagerflächen, Baupisten oder Baugruben erforderte bodenschützerische Massnahmen sowohl während der Bauzeit (Bodenabtrag und

Zwischenlagerung), als auch bei der Wiederherstellung (Rekultivierung) und der Rückgabe an die Bewirtschafter (Wiederinkulturnahme und Folgebewirtschaftung).

Über die mittel- bis langfristige Wirkung der vor rund zehn Jahren in der *Verordnung über Belastungen des Bodens* (Anonym 1998) festgelegten Bodenschutzvorschriften ist unseres Wissens noch wenig publiziert worden (vergleiche auch Kaufmann et al. 2009). Nach den Rekultivierungsarbeiten sind die Böden nur schwach aggregiert und mechanisch labil. Erst im Verlauf von mehreren Jahren erlangen sie durch die Entwicklung einer Bodenstruktur wieder eine gewisse Festigkeit. Bis zu diesem Zeit-

punkt reagieren rekultivierte Böden sehr empfindlich auf Belastungen von Fahrzeugen (Schäffer *et al.* 2007; Kaufmann *et al.* 2009).

Die vorliegende Untersuchung sollte die Frage klären, ob sich die unter bodenkundlicher Begleitung rekultivierten Böden am Ende der Folgebewirtschaftungsperiode von den natürlich gewachsenen Böden (Kontrolle) bezüglich des Eindringwiderstands unterscheiden.

Methode

Untersuchte Standorte

Entlang der NBS wurden zwei grossflächige Rekultivierungsstandorte und angrenzende, nicht vom Bau betroffene Parzellen beprobt:

- **Wanzwil:** Aushubdeponie, rekultivierte Fläche ca. 20 ha, natürliche Bodentypen: mässig tiefgründige bis tiefgründige Braunerden, Bodenart: sandiger Lehm. Skelettgehalt: Oberboden skelettarm (Steingehalt < 5 %), im Unterboden nimmt der Skelettgehalt mit der Tiefe zu (schwach skeletthaltig bis kieshaltig, Steingehalt 5 – 20 %).
- **Hersiwil:** Tagbautunnel, rekultivierte Fläche ca. 15 ha, natürliche Bodentypen: tiefgründige Braunerden und mässig tiefgründige Braunerde-Gleye. Bodenart: Lehm. Skelettgehalt: skelettfrei bis skelettarm (Steingehalt < 5 %).

Die Standorte unterschieden sich hinsichtlich bauführender Firmen und Entwässerungskonzepten. Die Kulturerdarbeiten erfolgten an beiden Orten nach den gültigen Richtlinien (Anonym 2000; Anonym 2001; Häusler und Salm 2001). Mittels Tensiometern¹ wurde sichergestellt, dass Eingriffe nur bei trockenen Bodenbedingungen erfolgten. Die Rekultivierungstechnik war an beiden Orten dieselbe (Abb. 1): Auf weichem Aushubmaterial wurde mittels Kalkstabilisierung und Verdichtung eine tragfähige, ausnivellierte Rohplanie erstellt. Unmittelbar vor dem Überschütten wurde die Rohplanie mittels Dozer 40 cm tief aufgerissen. Unter- und Oberboden wurden sodann mit Hydraulikbaggern streifenweise und locker geschüttet. Vor einem Traktoreinsatz auf einer frisch rekultivierten Fläche wurde mindestens vier Wochen abgewartet, damit sich der Boden auf natürliche Weise setzen konnte.

Für die Folgebewirtschaftung führte die SBB zusammen mit den beauftragten bodenkundlichen Baubegleitern eigens vertraglich vorgeschriebene Richtlinien ein (Anonym 2002). In den ersten drei Jahren nach der Rekultivierung war nur Kunstwiese (Luzerne-Mischungen) mit Silage- oder Dürrfuttergewinnung erlaubt, danach konnte eingeschränkter Ackerbau (keine Hack-

Zusammenfassung

Die Bahn 2000 Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist war eine der ersten Grossbaustellen, bei welcher die vor rund zehn Jahren eingeführten Bodenschutzvorschriften von der Planung über die Ausführung bis zur Folgebewirtschaftung konsequent umgesetzt und von einer bodenkundlichen Baubegleitung betreut wurden. Ziel dieser Studie war es, die mittel- bis langfristige Wirkung dieser Anstrengungen anhand eines einfach zu erhebenden Parameters möglichst flächendeckend zu überprüfen. In einer Felduntersuchung wurde dazu der Eindringwiderstand von rekultivierten Flächen am Ende der Folgebewirtschaftung und von benachbarten, natürlich gewachsenen Böden mittels Penetrometer gemessen und verglichen. Dabei wurden zwei Standorte (Wanzwil und Hersiwil) und zwei Fruchtfolge-, respektive Bodenbearbeitungszustände (Kunstwiese und Acker) sowie der volumetrische Bodenwassergehalt berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigen auf, dass sich die rekultivierten Böden nach sieben Jahren Folgebewirtschaftung bezüglich des Eindringwiderstands nicht von den umliegenden natürlichen Böden unterscheiden. Dank den umfangreichen Bodenschutzmassnahmen konnten demnach Verdichtungen vermieden werden. Aufgefallen ist, dass die rekultivierten Böden im Pflugsohlenbereich (25 – 35 cm) einen tendenziell geringeren Eindringwiderstand aufweisen. Dieser Qualitätsvorteil sollte durch pfluglose Bodenbearbeitung oder durch den Einsatz des Systems Onland-Pflug erhalten werden.



Abb. 1 | Streifenweise Rekultivierung der Ackerböden auf der Tunnelausbruch-Deponie Schacht bei Wanzwil: A=Oberboden; B=Unterboden; C=Rohplanie mit Kiesstreifen (Pfeil) als Drainage.

¹Tensiometer sind Messgeräte, welche die Saugspannung im Boden anzeigen.



Abb. 2 | Aufgefüllte Deponie Schacht bei Wanzwil mit Rekultivierungsperimeter und beprobten Parzellenpaaren (rote Linien). (K-A = Kontrolle-Acker; K-KW = Kontrolle-Kunstwiese; R-A = Rekultiviert-Acker; R-KW = Rekultiviert-Kunstwiese). Am unteren Bildrand ist die neue Bahnlinie erkennbar.

früchte) oder Weide betrieben werden. Mittlerweile befinden sich die Flächen im 8. Folgebewirtschaftungsjahr und in Kürze erfolgt die Übergabe an die Eigentümer und in die betriebsübliche Bewirtschaftung.

Feldexperiment mit Penetrometer

An beiden Standorten wurden jeweils zwei vergleichbare, möglichst nahe beieinander liegende Ackerparzellen (Wintergetreide) bestimmt: eine auf rekultiviertem Boden und eine auf gewachsenem als Kontrolle. Zusätzlich wurden in gleicher Weise je zwei Kunswiesenparzellen bestimmt. Insgesamt vier paarweise vergleichbare Parzellen, total acht Parzellen (Tab. 1; Abb. 2 für den Standort Wanzwil).

Die durchschnittliche Distanz zwischen den Parzellenpaaren betrug rund 120 m (gemessen von Parzellen-

Tab. 1 | Versuchsplan mit acht Varianten (2 Standorte * 2 Bodenalter * 2 Bodenbearbeitungsstufen), zugeteilten Parzellen und gemessenen Mittelwerten für den Cone Index (CI).

Standort	Bodenbearbeitung	Bodenalter	CI (MPa)
Wanzwil	Acker	Rekultiviert	1,29
		Kontrolle	1,35
	Kunstwiese	Rekultiviert	1,57
		Kontrolle	1,79
Hersiwil	Acker	Rekultiviert	2,29
		Kontrolle	2,58
	Kunstwiese	Rekultiviert	2,69
		Kontrolle	2,51

mitte zu Parzellenmitte). Bei den Rekultivierungsparzellen achtete man darauf, dass alle im gleichen Jahr (2002) geschüttet wurden. Die Einteilung nach Kunstwiese und Acker war nötig, um die Wirkung der Bodenbearbeitung mit dem Pflug zu berücksichtigen, welche zu geringeren Lagerungsdichten im Oberboden führt. Die Kunswiesen-Parzellen wurden mindestens ein Jahr lang nicht gepflügt, die Acker-Parzellen hingegen rund ein halbes Jahr vor der Beprobung.

Es wurden zwei Bodenkennwerte gemessen: der Eindringwiderstand (EW) und die Bodenfeuchtigkeit, d.h. der volumetrische Wassergehalt (θ). Der EW kann als Mass für die Verdichtung bzw. für die Durchwurzelbarkeit des Bodens bezeichnet werden. Man kann sich die Spitze eines Penetrometers als Wurzel vorstellen, die sich ihren Weg durch den Boden bahnen muss. Als vergleichbare Messgrösse wird üblicherweise der Cone Index (CI) verwendet, so auch in dieser Untersuchung. Beim CI handelt es sich um den Mittelwert der gemessenen Eindringwiderstände in Megapascal (MPa) in 1, 15, 30 und 45 cm Bodentiefe.

Als Messinstrument diente der Penetrologger Typ 06.15.SA der Firma Eijkelkamp (Abb. 3). Der Penetrologger ermöglicht Messungen bis in eine Tiefe von 80 cm durch manuelles Herunterdrücken der Sondierstange. Direkt am Penetrologger angeschlossen ist ein Bodenfeuchtesensor (TDR-Sonde) zur Ermittlung von θ mittels elektrischen Widerstands, jedoch nur in den obersten 10 cm. Die Messergebnisse werden automatisch in einem Datenlogger gespeichert und können über eine Schnittstelle von einem PC ausgelesen werden. Die acht Versuchsparzellen wurden je in acht Teilparzellen unterteilt, sogenannte Plots. Um einen zuverlässigen Messwert zu erhalten wurden pro Plot sieben Penetrationen getätigt und anschliessend der Mittelwert gebildet (insgesamt $7 \times 8 \times 8 = 448$ Messungen).

Messzeitpunkte und statistische Auswertung

Der volumetrische Wassergehalt θ nimmt erheblichen Einfluss auf die Messung des EW (Dexter *et al.* 2007; Kaufmann *et al.* 2009).

Um möglichst ähnliche Bodenbedingungen zu gewährleisten, wurden zeitlich nahe beieinander liegende Messungen angestrebt.

Geplant war, alle Messungen im Frühling 2009 bei Feldkapazität durchzuführen, also bei feuchtem Bodenzustand. In Wanzwil erfolgten die Erhebungen am 6. April. Danach setzte eine aussergewöhnliche Trockenperiode ein und die Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse konnten nicht mehr reproduziert werden. Die Messungen in Hersiwil erfolgten schliesslich am 13. Mai 2009, nachdem wieder einige Regenfälle durchs Land gezogen waren. Es



Abb. 3 | Penetrologger der Firma Eijkelkamp Agrisearch Equipment, Giesbeek (NL), mit Tiefenbezugsplatte und Feuchtigkeitssensor mit Kabel. (Foto: E. Stettler, 2009)

stellte sich jedoch heraus, dass θ trotzdem weit unter der Feldkapazität lag. Der Zeitpunkt konnte aber nicht weiter verschoben werden, da die Getreidekulturen bereits hoch standen. Das hat zur Folge, dass die Messwerte von Wanzwil und Hersiwil nicht direkt miteinander verglichen werden können.

Für die statistische Auswertung wurde für jede Parzelle der CI-Mittelwert aus den jeweils acht Mittelwerten der Plots berechnet (Tab. 1). Die Parzellenmittelwerte wurden dann zu Wertepaaren zusammengefasst, wobei an jedem Standort die Parzellen mit der gleichen Bodenbearbeitung auf rekultiviertem bzw. natürlich gewachsenem Boden ein Paar bildeten. Die vier so gebildeten Wertepaare wurden dann mit einem Wilcoxon signed-rank Test analysiert.

Resultate

Keine Unterschiede zwischen Kontroll- und rekultivierten Böden

Die statistische Analyse der CI-Daten ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten der Kontrollböden (CI = 2,06 MPa) und der rekultivierten Böden (CI = 1,96 MPa; $n = 4$, $W = 5$, $p > 0,05$).

Die grosse Differenz zwischen den Standorten Wanzwil und Hersiwil lässt sich primär auf ein unterschiedliches θ zurückführen: in Hersiwil wurden wegen den trockeneren Bedingungen höhere EW gemessen (Abb. 4).

Zwischen den Bodenbearbeitungszuständen (Kunstwiese - Acker) konnte ebenfalls kein gesicherter Unterschied festgestellt werden. Hier wurde ursprünglich vermutet, dass die tiefere Bodenbearbeitungsintensität, die höhere Befahrungsintensität (Futterernte), die intensivere Durchwurzelung und die höhere Evapotranspirationsrate (tieferes θ) bei Kunstwiesen-Böden einen signifikant höheren CI zur Folge haben.

Physikalische Bodenqualität

Aussagen zur physikalischen Bodenqualität (Vergleich mit Normen und Richtwerten) lassen sich ausschliesslich für Messungen nahe der Feldkapazität anstellen, was nur für Wanzwil möglich ist. Die folgenden Ausführungen gelten deshalb nur für diesen Standort.

In Wanzwil liegt der CI für die Ackerflächen mit 1,35 MPa (Kontrolle) und 1,29 MPa (Rekultiviert) klar unterhalb des von Locher und De Bakker (1990) als oberes Limit für ungestörtes Wurzelwachstum angegebenen Wertes von 1,5 MPa. Bei den Kunstwiesen liegt er mit 1,79 MPa (Kontrolle) und 1,57 MPa (Rekultiviert) leicht darüber. Allerdings fällt bei Betrachtung der EW-Verläufe auf, dass sich die Unterschiede zwischen Acker- und Kunstwiesen-Parzellen durch alle Bodenschichten hindurch ziehen. Das lässt auf einen systematischen Unterschied schliessen, der wahrscheinlich in Textur, Skelett oder θ zu suchen ist.

Der EW liegt beim Wanzwiler Oberboden (bis ca. 30 cm Tiefe) unterhalb dem von Horn *et al.* (2009) vorgeschlagenen Vorsorgewert von 2 MPa. Im Unterboden (30 bis 80 cm Tiefe) bewegt er sich etwas darüber (2 bis 3 MPa), wobei der EW bei den Kontrollparzellen gegenüber den rekultivierten Parzellen durchwegs um ca. 0.5 MPa höher liegt. Mögliche Gründe hierfür liegen in der Pflugsohle und im Skelettgehalt. Die Kontrollparzellen weisen im Bereich von 25 – 40 cm einen markant höheren EW auf, welcher so bei den rekultivierten Parzellen nicht zu beobachten ist. Dies ist eine erfreuliche Erkenntnis, die den Anstrengungen für die sorgfältige Folgebewirtschaftung ein gutes Zeugnis ausstellt. In den Kontrollparzellen führte der in tieferen Schichten (ab ca. 50 cm) zunehmende Skelettgehalt zu Problemen beim Einstechen mit dem Penetrologger und zu einer erhöhten Varianz der Messungen.

Die Daten von Hersiwil decken die Problematik von Messungen unterhalb der Feldkapazität auf. Es zeigt sich ein umgekehrtes Bild: der EW nimmt im Unterboden mit der Tiefe ab. Dies deutet auf ein zunehmendes

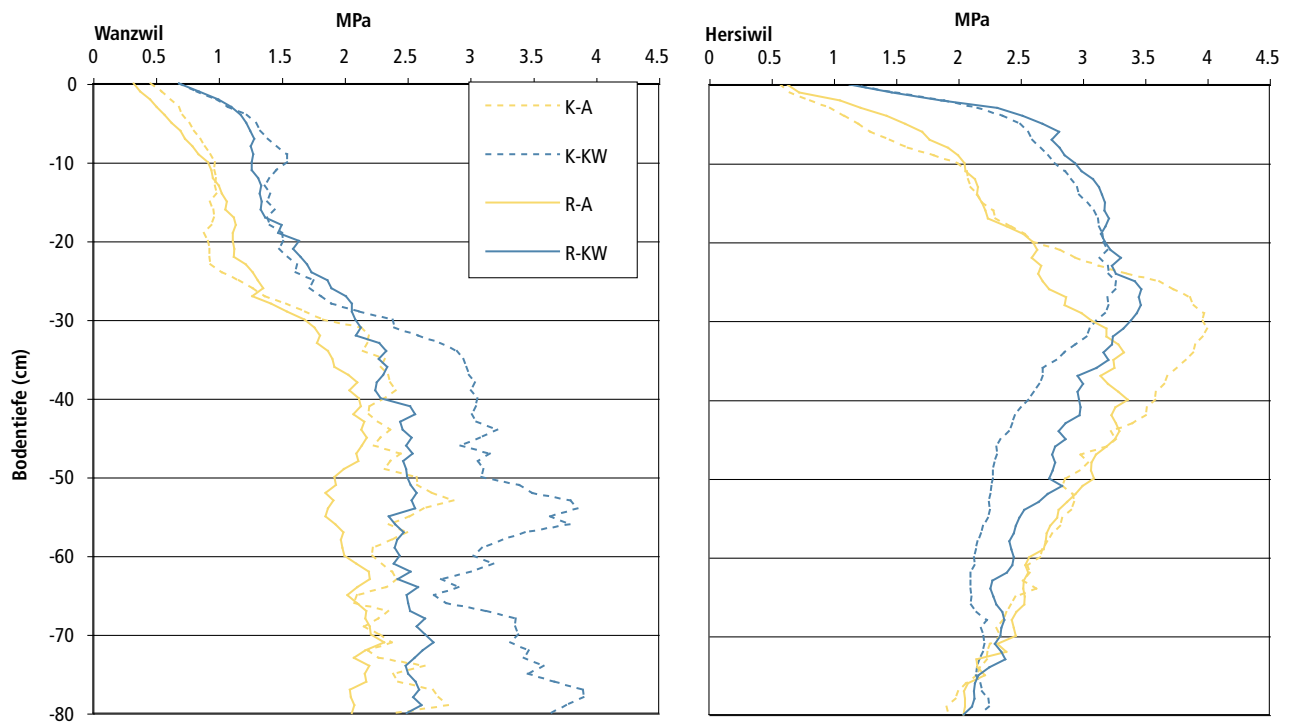


Abb. 4 | Eindringwiderstände nach Standorten (K-A = Kontrolle-Acker; K-KW = Kontrolle-Kunstwiese; R-A = Rekultiviert-Acker; R-KW = Rekultiviert-Kunstwiese).

des θ in tieferen Bodenschichten hin. Trotzdem ist eine deutliche Pflugsohle bei den Ackerflächen der Kontroll-Parzellen zu erkennen.

Bodenschutzmassnahmen haben sich bewährt

Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass sich die Lagerungsdichte der untersuchten Böden trotz Bodenabtrag, Zwischenlagerung, Schüttung und während der Folgebewirtschaftung nicht erhöht und somit nicht verschlechtert hat. Auffällig ist, dass die rekultivierten Böden im Pflugsohlenbereich (25 – 35 cm) einen tendenziell geringeren Eindringwiderstand aufweisen. Dieser Qualitätsvorteil sollte durch pfluglose

Bodenbearbeitung oder durch den Einsatz des Systems On-land-Pflug erhalten werden.

Die vor ca. zehn Jahren eingeführten Bodenschutzvorschriften und die von der SBB eigens für die Folgebewirtschaftung eingeführten Richtlinien scheinen sich damit im vorliegenden Fall als erfolgreiche Massnahmen zur Vermeidung von Bodenverdichtungen erwiesen zu haben. Es gilt in zukünftiger Forschung zu untersuchen, wie sich das Porensystem von Rekultivierungen entwickelt und ob die Porenkontinuität (die Vernetzung der Hohlräume untereinander) wieder dasselbe Niveau erreicht wie bei natürlichen Böden. ■

Literatur

- Anonym, 1998. Verordnung über die Belastung des Bodens vom 1. Juli 1998 (Stand 1. Juli 2008), Schweizerischer Bundesrat.
- Anonym, 2000. Schweizer Norm SN 640 583: «Erdbau, Boden – Eingriff in den Boden, Zwischenlagerung, Schutzmassnahmen, Wiederherstellung und Abnahme». Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute VSS, Zürich.
- Anonym, 2001. FSK Rekultivierungsrichtlinie. Schweiz. Fachverband für Sand Kies und Beton FSKB, Bern.
- Anonym, 2002. Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist, Rekultivierte Landwirtschaftsflächen, Richtlinien für Abnahmen und Folgebewirtschaftung. Schweizerische Bundesbahnen SBB, Bern.
- Dexter A. R., Czyz E. A. & Gate O. P., 2007. A method for prediction of soil penetration resistance. *Soil and Tillage Research* **93**, 412–419.
- Häusler S. & Salm Ch., 2001. Bodenschutz beim Bauen. *Leitfaden Umwelt* **10**, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Bern.
- Horn R., Fleige H. & Peth S., 2009. Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkunde. *Bodenschutz* (3/09), 80–85.
- Kaufmann M., Tobias S. & Schulin R., 2009. Development of the mechanical stability of a restored soil during the first 3 years of recultivation. *Soil and Tillage Research* **103**, 127–136.
- Locher W. P. & De Bakker H., 1990. Bodenkunde van Nederland, Deel 1. Malmberg, Den Bosch (NL).
- 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.

Riassunto

Confronto tra terreni ricoltivati e terreni a crescita naturale

La nuova tratta ferroviaria Mattstetten-Rothrist, costruita nell'ambito del progetto Ferrovia 2000, è stato uno dei primi grandi cantieri nel quale le direttive sulla protezione del suolo, stabilite una decina d'anni fa, sono state rigorosamente applicate, durante la fase di pianificazione, realizzazione e assestamento, dagli specialisti della sorveglianza del suolo.

L'obiettivo del presente studio era di esaminare gli effetti a medio lungo termine risultanti da questo notevole sforzo, utilizzando semplici parametri che possano essere applicati su vaste superfici.

Nelle analisi del suolo, tramite penetrometro dinamico, è stata misurata e messa a confronto la resistenza di penetrazione dei suoli rinaturalizzati tramite sistema di ricoltivazione con quelli a crescita naturale. Lo studio è stato eseguito in due località (Wanzwil e Hersiwil), su due tipi di terreni coltivati (prato artificiale e cereali) considerando l'umidità del suolo.

I risultati dimostrano che dopo sette anni, per quel che concerne la resistenza alla penetrazione, i terreni ricoltivati non si differenziano dai suoli a crescita naturale.

Grazie alle misure di protezione si è dunque impedito una compattazione del suolo.

Inoltre si nota che i suoli ricoltivati presentano una resistenza leggermente inferiore alla penetrazione nella profondità di aratura (25–35 cm).

Questo vantaggio qualitativo dovrebbe venir conservato rinunciando alla lavorazione del terreno con aratri oppure tramite l'aratura semiporante.

Summary

Comparison between restored and naturally developed soils

The new Mattstetten-Rothrist rail line builded in the frame of «Railway 2000» was one of the first large-scale construction projects to strictly implement soil protection regulations introduced about 10 years ago. Supervised by a pedological consultation team, this was realised from the planning of the project to subsequent soil management. The objective of this study was to examine the mid- to long-term effects of these efforts using easy-to-apply parameters, and covering as wide an area as possible. Using a penetrometer, penetration resistance of both restored areas and neighbouring, naturally developed soils were measured and compared in a field study at the end of the subsequent management. Two locations (Wanzwil and Hersiwil) and two types of soil cultivation (ley and field) as well as volumetric soil water content were taken into consideration. The results demonstrate that after seven years of subsequent management, restored soils show no difference from naturally produced ones with regard to penetration resistance. Thus, by applying extensive soil protection measures, it was possible to avoid soil compaction. Particularly noticeable fact was that the restored soils in the plow pan strata (25–35 cm) showed somewhat lower penetration resistance. This qualitative advantage should be maintained through plowless tillage or through the use of On-land-Plow systems.

Key words: soil restoration, soil compaction, penetration resistance, plow pan, plowless tillage.