

# Multi criteria evaluation of land restoration for agricultural use

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Kaufmann, Manfred

**Publication date:**

2008

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005712416>

**Rights / license:**

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

Diss. ETH No. 17744

**Multi Criteria Evaluation of Land Restoration for Agricultural Use**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

For the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by

MANFRED KAUFMANN  
Dipl. nat. ETH  
born 16 January 1967  
citizen of Ehrendingen AG and Horw LU

Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner  
Prof. Dr. Alexander McBratney, co-examiner  
Dr. Silvia Tobias, co-examiner  
Dr. Martin Fritsch, co-examiner

2008



## Summary

---

Soil restoration on former construction or exploitation sites or deposits is of increasing importance. When soil is restored for agricultural land use, the primary goal is to re-establish a high and sustainable soil quality for plant productivity. At the beginning of the process after excavation and refilling, restored soils are mechanically labile. Inadequate restoration procedures and over-use of restored soils often lead to over-compaction, water-logging and insufficient aeration, which are difficult to remediate. Hence, good practices for soil restoration and subsequent management have been proposed in official guidelines. However, there is a lack of methods suited for practical applications to monitor and assess the physical quality of restored soils for plant production and their sensitivity to compaction.

Addressing the need for an improved evaluation framework for restored soils, the specific objectives of this study were (1) to develop a methodology to assess the quality of restored soils and to compare this methodology with existing approaches, (2) to propose a simple indicator for the assessment of physical soil quality, and to compare the critical limits of this indicator with existing soil quality indicators, (3) to monitor the development of the physical quality and the mechanical stability of soil that had been restored according to pertinent regulations and (4) to develop multiple linear regression functions to determine the soil mechanical parameters precompression stress and the compaction index from basic soil properties.

A fuzzy logic expert system for the evaluation of the physical quality of soil for plant production was developed and applied on 10 restored and 10 adjacent non-restored soils. Physical soil quality decreased or remained unchanged after soil restoration at most investigated sites. Only two horizons showed improved soil conditions after restoration. The fuzzy logic expert system is based on the statements of a group of soil scientists relating physical soil quality for plant production to packing density, penetration resistance, air capacity and saturated hydraulic conductivity. The

participating experts were asked to express their own evaluation standards in fuzzy sets and their judgements were fairly consistent. Although the interactions between parameters were modelled in different ways by them it was possible to incorporate most of the experts' opinions in a consistent rule base. The fuzzy logic expert system for the assessment of physical soil quality of restored soils gave very plausible results and the assessments matched well with two other indicators of the physical quality of soil, the least limiting water range and the so-called S-parameter (i.e. the slope of the soil water retention curve at the inflection point). The fuzzy logic approach proved to be a very flexible and appropriate tool for modelling the dependence of physical soil quality on the considered input parameters.

A literature study was conducted on optimum and limiting bulk densities of soils of different textures for plant production. The results suggest that both optimum bulk density and limiting bulk density can be satisfactorily derived by pedotransfer functions from general soil properties such as clay and silt content. Optimum and limiting values of bulk density can be transformed into optimum and limiting packing density values which are less dependent on soil texture. A packing density value of 1.70 is suggested as a threshold value that divides between optimum and limiting conditions for root and plant growth. Two other soil properties were identified as indicators of the state of compaction of a soil: the least limiting water range and S-parameter. The three indicators were measured or calculated by means of pedotransfer functions in 59 soil horizons sampled in Northern Switzerland. Packing density (PD), least limiting water range (LLWR) and S-parameter were linearly correlated. The results further indicate that the critical limits for root and crop growth, that were established for PD, LLWR and S-parameter, functionally correspond to each other.

In a field study on a soil that was freshly restored according to pertinent guidelines we monitored over three years the regeneration of some physical soil quality indicators (bulk density, coarse porosity and penetration resistance) and the development of indicators of mechanical stability (precompression stress and compression index). The comparison of the measurements with literature values indicated that the state of compaction of the restored soil was very low at the beginning of the measurements and

close to optimum for plant growth after three years of controlled management. Precompression stress remained low in the topsoil as well as in the subsoil over the entire study period. Precompression stress was correlated to a number of soil parameters, but it could not be successfully predicted by means of multiple linear regression functions from the measured input parameters. The compression index is often considered as a soil parameter that should not be affected by compaction. However, we found a strong positive correlation between initial void ratio and the compression index. As a consequence, the virgin compression lines of soil samples with differing initial void ratios did not align as would be expected if the samples had the same mechanical structure. The void ratio remained smaller for an initially dense soil at any given stress than for a less dense soil. It appears that the state of compaction of the restored soil was determined not only by the exerted stresses during wheeling operations but also by the initial packing after restoration. This suggests that the restoration technique has a decisive influence on the future development of the state of compaction.

The three-year study of the previously restored soil demonstrates that good physical soil quality can be achieved if adequate restoration techniques and subsequent management practices are applied. On the other hand, the results of the evaluation of 10 restored soils and 10 adjacent non-restored soils with the fuzzy logic expert system suggest that soil restoration is often associated with a decrease of physical soil quality for plant productivity. Restoration of these sites was done ignoring existing guidelines which require the use of proper parent material, the reconstruction of original soil layering, and the application of adequate restoration techniques. As a conclusion, the many uncontrolled small-scale soil restorations which can be seen nowadays in many places are more problematic than the large-scale restorations which are planned and supervised by soil experts.

## Zusammenfassung

---

Die Rekultivierung von Baustellen, Deponien und Abbauflächen gewinnt zunehmend an Bedeutung. In den meisten Fällen ist das Ziel der Rekultivierung die Rückgewinnung von landwirtschaftlicher Nutzfläche mit guter Bodenfruchtbarkeit. Frisch rekultivierte Böden sind jedoch mechanisch labil und verdichtungsanfällig. Eine unangepasste Rekultivierungstechnik oder Folgebewirtschaftung führt oft zu Bodenverdichtung mit Vernässung und verminderter Bodendurchlüftung. Vor einigen Jahren wurden deshalb in der Schweiz verschiedene Richtlinien zur fachgerechten Rekultivierung und Folgebewirtschaftung erlassen. Bis anhin fehlen aber praxistaugliche Methoden, um die physikalische Bodenqualität von Rekultivierungen und ihre Verdichtungsanfälligkeit zu überwachen und zu bewerten.

Das Ziel der vorliegenden Studie war es (1) eine Methode zur Beurteilung der physikalischen Bodenqualität auf rekultivierten Flächen zu entwickeln, diese Methode in Fallbeispielen anzuwenden und die Resultate mit bestehenden Bewertungsansätzen zu vergleichen, (2) einen einfachen Indikator für die Beurteilung der physikalischen Bodenqualität vor-zuschlagen, einen entsprechenden Beurteilungsmassstab zu entwickeln und mit anderen Indikatoren zu vergleichen, (3) die Entwicklung von Indikatoren für die physikalische Bodenqualität und die mechanische Stabilität auf einer nach gültigen Richtlinien neu rekultivierten Fläche während dreier Jahre zu untersuchen und (4) multiple lineare Regressionsfunktionen für die Vorbelastung und den Kompressionsindex aus einfach messbaren Bodeneigenschaften abzuleiten.

In der vorliegenden Studie wurde ein fuzzy logic Expertensystem zur Beurteilung der physikalischen Bodenqualität entwickelt und auf 10 rekultivierten Böden und benachbarten Referenzböden angewendet. Auf der Mehrzahl der Böden verschlechterte sich mit der Rekultivierung die physikalische Bodenqualität oder sie blieb unverändert. Nur in zwei der untersuchten Horizonte konnte eine Verbesserung beobachtet werden.

Das fuzzy logic Expertensystem basiert auf den Einschätzungen einer Gruppe von Bodenexperten, die den Einfluss der Eingangsgrößen Packungsdichte, Eindringwiderstand, Luftkapazität und gesättigte Wasserleitfähigkeit auf die physikalische Bodenqualität für das Pflanzenwachstum beurteilt haben. Die beteiligten Experten haben ihre Beurteilungsmassstäbe untereinander konsistent in fuzzy sets ausgedrückt. Obwohl die Interaktionen zwischen den einzelnen Parametern von den Experten unterschiedlich modelliert wurden, konnte ein in sich konsistentes Expertensystem aufgebaut werden. Das Expertensystem ergab plausible Resultate, die ausserdem gut mit zwei weiteren Indikatoren der physikalischen Bodenqualität, dem „least limiting water range“ und dem „S-parameter“, im Einklang stehen. Insgesamt erwies sich das fuzzy logic Expertensystem als sehr flexibles und zweckmässiges Werkzeug zur Modellierung der physikalischen Bodenqualität auf Basis der verwendeten Eingangsgrößen.

In einer Literaturstudie wurden optimale und limitierende Lagerungsdichten für Böden von unterschiedlicher Textur zusammengestellt. Die Resultate zeigen, dass sowohl die optimale als auch die limitierende Lagerungsdichte in pedotransfer Funktionen aus dem Tongehalt und dem Siltgehalt abgeleitet werden können. Die optimalen und limitierenden Lagerungsdichten können dann in optimale und limitierende Packungsdichten umgeformt werden, die weitgehend unabhängig von der Textur sind. Der Packungsdichtewert von 1.70 wird als Grenzwert vorgeschlagen, der zwischen optimalen und limitierenden Bedingungen für das Pflanzenwachstum unterscheidet. Die Packungsdichte wurde ausserdem mit dem least limiting water range und dem S-parameter verglichen. Alle drei Indikatoren für den Verdichtungszustand wurden in 59 Bodenhorizonten aus der Nordschweiz gemessen oder aus pedotransfer Funktionen hergeleitet und waren gut linear korreliert. Die Resultate haben ausserdem aufgezeigt, dass die Beurteilungsmassstäbe der drei Indikatoren bezüglich der Bedeutung für das Pflanzenwachstum weitgehend übereinstimmen.

In einer Feldstudie auf einer frisch und gemäss Richtlinien rekultivierten Fläche wurden über drei Jahre die Entwicklung einiger Indikatoren für die physikalische Bodenqualität (Lagerungsdichte, Makroporosität und Eindringwiderstand) und für die



mechanische Stabilität (Vorbelastung und Kompressionsindex) überwacht. Der Verdichtungszustand der Rekultivierung war zu Beginn der Untersuchung sehr tief, aber nach dreijähriger kontrollierter Bewirtschaftung nahezu optimal für das Pflanzenwachstum. Die Vorbelastung blieb während des ganzen Untersuchungszeitraums sowohl im Ober- wie im Unterboden tief. Die Vorbelastung war zwar mit mehreren weiteren Messparametern korreliert, sie konnte aber nicht mit befriedigender Genauigkeit mit multipler linearer Regression aus den anderen Grössen abgeleitet werden. Der Kompressionsindex wird in der Literatur oft als inhärenter, vom aktuellen Bodenverdichtungszustand unabhängiger Parameter angesehen. Entgegen den Erwartungen beobachteten wir eine starke Korrelation zwischen der Porenziffer und dem Kompressionsindex. Die Erstverdichtungsgeraden von Proben mit unterschiedlicher Porenziffer stimmten nicht überein, wie das für Proben mit derselben mechanischen Struktur erwartet würde. Eine anfänglich lockere Probe liess sich auch unter sehr hohen Belastungen weniger stark komprimieren als eine anfänglich dichtere Probe bei der gleichen Belastung. Dies legt den Schluss nahe, dass sich sorgfältiges Rekultivieren auf jeden Fall auszahlt.

Die Ergebnisse aus der dreijährigen Feldstudie belegen, dass bei fachgerecht erstellten Rekultivierungen eine gute physikalische Bodenqualität erreicht und mit sorgfältiger Folgebewirtschaftung auch längerfristig erhalten werden kann. Auf der anderen Seite zeigte der Vergleich von 10 rekultivierten Böden mit benachbarten Referenzböden, dass kleinflächige Rekultivierungen die nicht nach den bestehenden Richtlinien durchgeführt werden, häufig mit einer Beeinträchtigung der physikalischen Bodenqualität einhergehen. Deshalb stellen die zahlreichen kleinflächigen, oftmals unbewilligten oder unkontrollierten Geländeauffüllungen heute das grössere Problem dar als grossflächige Rekultivierungen, die durch bodenkundliche Baubegleitung geplant und überwacht werden.