

Diss. ETH No. 21737

**Structural Recovery of Compacted Forest Soils
through the Planting of Black Alder**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
Christine Meyer
Diploma in Biology, University of Düsseldorf
born March 11th, 1981
Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Rainer Schulin, examiner
Dr. Peter Lüscher, co-examiner
Prof. Dr. Franz Makeschin, co-examiner

2014

Summary

During the last decades, the forestry sector experienced profound changes all over the world through progress in mechanization. However, the machinery used in modern forest harvest operations has not only become very efficient, but at the same time also very heavy. This has led to widespread negative effects on forest soils. Mechanized forest harvest operations have become a frequent cause of severe soil compaction and thus of substantial damage to site fertility and productivity. While the impacts of soil compaction are well known, little is still known about the processes involved in the recovery of soil structure from compaction in forests, their time scale and possible measures to promote and enhance them.

In Switzerland, substantial soil compaction in forests was recently caused by the clearing of windfall sites after the storm “Lothar” in 1999. The damages produced by these operations provided the motivation and opportunity for the research project on which this thesis is based. For this purpose, two Lothar windfall sites were selected on the Swiss Plateau, one at Habsburg (AG, Luvisol, silt loam) and one at Messen (SO, gleyic Cambisol, sandy loam), where we studied the potential use of planting black alder (*Alnus glutinosa*) seedlings into the rut beds of skid lanes to enhance structural recovery of severely compacted soil beneath. As an additional treatment, compost was applied to some of the wheel tracks. The objectives of this PhD project were (i) to prove the suitability of black alder as a pioneer forest species for regeneration measures in compacted soils, (ii) to assess the potential of black alder trees to enhance the structural regeneration of compacted forest soils under field conditions and to identify the dominant processes through which young alder trees influence the regeneration process, and (iii) to evaluate parameters that can be used in practice to characterize the

degree of soil compaction and to monitor the process of structural regeneration of forest soils.

In 2009 we started to investigate root development and regeneration of soil structure. Tree growth, root development and morphology were used to test for the ability of black alder to grow on compacted soil and therefore their suitability and potential for regeneration purposes. Soil physical, mechanical and chemical parameters were analysed to evaluate the efficiency of the plantation and compost treatments. Furthermore, we investigated the governing processes and limiting factors of soil structure regeneration. Morphological soil features, such as hydromorphy, soil structure (aggregation) and root count data were used for visual assessment of the soil compaction and regeneration status.

Tree growth was exceptionally strong on the skid lanes compared to tree growth on undisturbed reference soil, and even compared to growth of black alders on their natural habitats reported in the literature. Rooting patterns (from root counts) and root mass densities confirmed that, except of some morphological adaptations (flattened root growth) black alder was able to develop root systems without major limitations due to soil compaction. Generally, compost application enhanced root development, but did not have any significant effect on tree growth. The only difference between the two sites concerning compost application was that at Habsburg root mass density was predominantly enhanced in topsoil layers associated with a limited root growth in the subsoil. The strong growth of black alder and the rooting data proved that this tree species was particularly well-suited for plantings in compacted soil, which is generally associated with adverse growing conditions for most of the commercial tree species.

To obtain a detailed overview of the effect of alder planting on soil structure regeneration, we measured a set of soil physical and mechanical parameters, including bulk density, porosity (total, coarse and fine to intermediate), air permeability and precompression stress. All parameters showed a positive feedback on alder planting compared to the skid lanes without planting, especially in the depth interval between 0.2-0.3 m. However, the effect was less pronounced in the subjacent depth intervals (0.4-0.5 and 0.6-0.7 m). In most cases, skid lane treatments did not reach the values of the undisturbed reference soil, which suggests that structure regeneration was still far from complete after 6-7 years. The most pronounced effects were found for air permeability measurements, where the treatments approached the values of the undisturbed reference soil in the immediate vicinity. Furthermore air permeability was the only parameter showing a response in the black alder treatments even in the subsoil intervals (0.4-0.5 and 0.6-0.7 m), where the correlation to root mass density was increasing with depth. All physical and mechanical soil parameters were closely correlated to root mass density. These findings suggested that the roots of the planted alder trees indeed initiated structure recovery by generating new pore space. Reflecting the effect of compost on root growth, compost application enhanced soil structure regeneration on one site (Messen), but had a retarding effect on the other site (Habsburg).

To test our approach on a wider scale in practice, methods are required to evaluate the success of tests in the field that are easy to apply also by practitioners. We investigated the potential use of soil structure and hydromorphic soil features as field indicators of recovery from soil compaction. Classification by morphological features of soil structure compared well with the physical soil compaction parameters bulk density and precompression stress as predictors of

compaction state and treatment effects, while hydromorphic soil features were less closely related to the physical soil parameters and reflected compaction and treatment effects only on one site. In addition, the value of soil hydromorphy as indicator of compaction and treatment effects depended much more on site and sampling depth than the structure-based indicator. In conclusion, using visual assessment of soil morphology in the field was found to be a promising approach for assessing forest soil compaction, but interpretation of soil hydromorphy for this purpose requires great care. Further development of this approach should rather focus on structural features.

All results presented in the scope of this thesis, indicated that planting of black alders enhanced the regeneration of compacted soil by generating air-conducting porosity and thereby promoting other biotic structure-formation processes. To our knowledge this was the first time that a field trial on forests soils showed that planting of a pioneer forest tree species successfully enhanced soil structure regeneration. Planting of black alder has proved its great potential as an environmentally friendly measure to accelerate the structural regeneration of compacted forest soils in temperate humid climates. The visual soil assessment proved itself as a valuable and promising tool for the evaluation of the compaction status of the soil and regeneration status.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten durchlief die Forstwirtschaft umfassende Veränderungen im Zusammenhang mit dem allgemeinen Fortschritt in der Maschinenteknik. Moderne Forstmaschinen sind im Vergleich zu den früher genutzten Forstraktoren wesentlich effektiver und zugleich auch wesentlich schwerer geworden. Moderne, schwere Forstmaschinen werden weltweit eingesetzt, ein Bewusstsein für die negativen Effekte der Befahrung des Waldbodens entwickelte sich aber erst im Verlaufe der Zeit. Die mechanisierte Holzernte kann unter bestimmten Bedingungen substantielle Schädigungen des Bodens hervorrufen, die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigen und die Ertragsfähigkeit forstlicher Produktionsflächen erheblich einschränken. Inzwischen sind die Folgen der Bodenverdichtung allgemein wohl bekannt und gut erforscht. Die Regeneration verdichteter Böden, die Dauer dieser Prozesse und vor allem Möglichkeiten die Strukturregeneration verdichteter Waldböden zu beschleunigen, sind bis jetzt jedoch nur wenig bekannt.

Der Ausgangspunkt für das im Folgenden vorgestellte Forschungsprojekt war der Sturm „Lothar“ 1999 und die anschliessenden Räumungsarbeiten in den Wäldern, welche teilweise unter Zeitdruck, ungeplant und ohne Rücksicht auf die vorherrschenden Bodenbedingungen durchgeführt wurden. An vielen Orten in der Schweiz führte dies zu erheblichen Bodenschäden. Es entstand Handlungsbedarf und ein Interesse an Forschung im Bereich „Regeneration von Wurzelraumfunktionen“. Die Untersuchungen zu dieser Arbeit wurden auf zwei „Lothar-Reservatsflächen“ im Schweizer Mittelland durchgeführt, einerseits in Habsburg (Kanton Aargau, schluffig bis lehmige Braunerde) und andererseits in Messen (Kanton Solothurn, sandig bis lehmige, pseudovergleyte Braunerde). Um die Strukturregeneration zu fördern und zu beschleunigen wurden 2003

Schwarzerlensetzlinge (*Alnus glutinosa*) direkt in stark verdichtete Fahrspuren gepflanzt. Als zusätzliche Behandlung wurden einige der bepflanzten Fahrspuren mit Kompost aufgefüllt. Die Ziele dieser Arbeit waren (i) das Potential der Bepflanzungsmassnahmen für die Strukturegeneration verdichteten Waldbodens zu evaluieren, (ii) die Prozesse durch welche die Schwarzerlen die Regeneration des Bodens fördern zu beschreiben und (iii) die Identifizierung von Parametern anhand derer der Grad der Bodenverdichtung, sowie dessen Regeneration am besten und einfachsten beschrieben werden kann.

In 2009 begannen die Untersuchungen im Bereich des Wurzelraums der gepflanzten Erlen um den Fortschritt der Regeneration beider Standorte beschreiben zu können. Um die Eignung der Schwarzerle im verdichteten Boden zu wachsen, deren Fähigkeit und ihre Wirkung als „biologische Bodensaniererin“ zu untersuchen, wurden das Höhenwachstum der Bäume und deren Wurzelmasse bestimmt, sowie morphologische Anpassungen des Wurzelsystems an Bodenverdichtung untersucht. Bodenphysikalische, mechanische und chemische Kenngrößen wurden erhoben um die Effizienz der Anpflanzungen und der Kompostzugabe zu bestimmen und um Rückschlüsse auf Regenerationsmechanismen und –prozesse machen zu können. Morphologische Bodenmerkmale, wie Vernässungsmerkmale und die Bodenaggregation, sowie Fein- bzw. Grobwurzelverteilungen wurden an mehreren Profilen aufgenommen und genutzt um die Bodenverdichtung und deren Regeneration weiter zu beschreiben.

Das Höhenwachstum der Schwarzerlen in den Fahrspuren war, im Vergleich zu dem Wachstum der Schwarzerlen auf der unbefahrenen Referenzfläche und verglichen mit Literaturangaben, welche sich auf den natürlichen Lebensraum der Schwarzerlen bezogen, überdurchschnittlich hoch. Die Wurzelverteilungen

und Wurzelmassen belegten, dass bis auf ein paar wenige morphologische Anpassungen, wie ein abgeflachtes, fächerartiges Wurzelwachstum, die Schwarzerlen in der Lage waren den Wurzelraum unterhalb der Fahrspuren ohne Einschränkungen zu erschliessen. Die Zugabe von Kompost erhöhte generell das Wurzelwachstum, zeigte jedoch keine Wirkung auf das Höhen- oder Dickenwachstum der Bäume. Zwischen den beiden Untersuchungsgebieten gab es jedoch einen grossen Unterschied bezüglich der Kompostwirkung. In Habsburg wurde die Wurzeldichte vornehmlich im Oberboden erhöht, war aber dafür in der Kompostbehandlung deutlich geringer im Unterboden. Das gute Wachstum der Bäume und die Wurzeldaten bestätigten, dass die Schwarzerle - im Gegensatz zu den meisten Nutzbaumarten - im verdichteten Boden, sehr gut gedieh und somit eine sehr gute Wahl für die Bepflanzung der Fahrspuren war.

Um die Effekte der Bepflanzung auf den Boden zu quantifizieren wurden physikalische und mechanische Bodenparameter, wie die Lagerungsdichte, Fein- und Grobporositätswerte, die Luftleitfähigkeit und die Vorverdichtung bestimmt. Alle aufgenommenen Parameter zeigten eine Verbesserung durch die Bepflanzung im Vergleich zu den unbepflanzten Fahrspuren, wobei in der oberen Beprobungstiefe zwischen 0.2-0.3 m die stärksten Effekte gemessen wurden. In den darunter liegenden Beprobungstiefen (0.4-0.5 m, 0.6-0.7 m) fielen die Effekte deutlich geringer aus. In den meisten Fällen erreichten die Werte in den Behandlungen jedoch nicht diejenigen des unbefahrenen Referenzbodens, was darauf hinweist, dass die Strukturregeneration nach 6-7 Jahren auch mit Bepflanzung noch nicht vollständig war. Den grössten Effekt hatten die Schwarzerlen auf die Luftleitfähigkeit, welche in den bepflanzten Fahrspuren das Niveau des unbefahrenen Referenzbodens erreichte. Darüber hinaus war die Luftleitfähigkeit einer der einzigen Parameter der sogar einen eindeutigen Effekt

der Bepflanzung im Unterboden zeigte, welcher zudem mit der Wurzelichte korreliert war. Generell konnten aber auch alle anderen erhobenen physikalischen und mechanischen Parameter mit der Wurzelmasse korreliert werden. Diese Zusammenhänge liessen den Schluss zu, dass die Wurzeln der Schwarzerlen die Strukturregeneration durch die Bildung zusätzlicher, luftleitender Poren initiierten. Die fördernden Auswirkungen des Kompost auf die Wurzelbildung schlug sich dabei auch förderlich auf die Strukturregeneration des Bodens in Messen nieder, während in Habsburg der Kompost nicht zur Verbesserung des Effekts der Erlen beitrug und eher eine hemmende Wirkung hatte.

Um unseren Versuchsansatz weiter in der Praxis testen zu können werden Methoden gebraucht, welche auch für Praktiker anwendbar sind und eine Evaluierung des Erfolgs von Bepflanzungsmassnahmen im Feld erlauben. Zu diesem Zweck wurde der potentielle Nutzen von Bodenstruktur- und Vernässungsmerkmalen als Indikatoren für die Regeneration verdichteten Bodens durch die Schwarzerlen untersucht. Die kategorisierten Bodenmerkmale zeigten einen engen Bezug zu den physikalischen Kenngrössen Lagerungsdichte und Vorverdichtung, und somit zum Verdichtungszustand und den Behandlungseffekten. Hydromorphiemerkmale zeigten eine weniger starke Beziehung zu den physikalischen Parametern und spiegelten die Behandlungseffekte nur an einem Standort wieder. Die Kategorisierung von Hydromorphiemerkmalen war also vielmehr von Standort und der Bepflanzungstiefe abhängig als die Kategorisierung der Strukturmerkmale. Dementsprechend empfiehlt sich für die Beurteilung der Bodenverdichtung am forstlichen Standort vornehmlich durch Strukturmerkmale vorzunehmen, während Hydromorphiemerkmale nur mit Vorsicht und guter Standortkenntnis interpretiert werden sollten.

Alle, der im Rahmen der Doktorarbeit gemachten, Untersuchungen bestätigten die Wirksamkeit der Bepflanzung auf die Strukturregeneration des verdichteten Bodens durch die Erweiterung des Porenraums. Von grösster Bedeutung dabei war anscheinend, dass die neu gebildeten Poren erheblich zur weiteren Durchlüftung des Bodens beitragen und so weitere, natürliche Regenerationsprozesse durch die Bodenfauna fördern konnten. Unserem Wissen nach ist dies die erste Studie auf einem forstlichen Standort in der eine beschleunigte Regeneration von verdichtetem Boden durch die Bepflanzung mit einer Vorwaldbaumart nachgewiesen werden konnte. Die Bepflanzung durch Schwarzerlen hat sich somit, zumindest für die hiesigen klimatischen Verhältnisse, als eine effektive und umweltfreundliche Methode erwiesen, verdichteten Waldboden zu regenerieren. Die morphologische Bodenbeurteilung konnte als wertvolles Werkzeug für die Beurteilung des Bodens in der forstlichen Praxis bestätigt werden, mit welcher man nicht nur die Verdichtung des Bodens charakterisieren kann, sondern auch das Fortschreiten des Regenerationsprozesses.