

# Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden

Antworten aus einer Literaturstudie und eigenen Untersuchungen

Johann Kremer

**Gesunde, gut strukturierte Böden sind eine Voraussetzung für die nachhaltige Nutzung forstlicher Standorte. Der Boden muss wichtige Funktionen erfüllen: Er ist effektiver Wasserspeicher und Nährstofflieferant, und er bietet potentiellen Wurzelraum für die Vegetation. Ungestörte Waldböden weisen ein optimal verteiltes Hohlraumsystem auf, das die ökologisch bedeutenden Funktionen über ein Netzwerk enger bis grober Poren ermöglicht. Jedoch verursachen die in der Holzernte eingesetzten schweren Forstmaschinen bereits bei der ersten Überfahrt Strukturveränderungen, die die Bodenfunktionen beeinträchtigen können. Eine Literaturstudie und eigene Untersuchungen gehen den Fragen nach, in welchem Umfang und in welchem Zeitraum sich geschädigte Böden wieder regenerieren können.**

Rationalisierungsdruck und ständige Anforderungen an die Produktivitätssteigerung führen unweigerlich zu höheren Maschinengewichten in der Holzernte. Bereits ab der ersten Überfahrt wirken dynamische Belastungsspitzen bis in größere Tiefen. Auf einem Großteil der Waldböden verursacht das Befahren tiefgreifende und lang anhaltende Veränderungen, die wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen können. »Im verformten Boden sind auf Grund des Makroporenkollapses ökologisch wichtige Transfergrößen wie der Diffusionskoeffizient oder die hydraulische Leitfähigkeit erheblich vermindert, was zu einer drastisch eingeschränkten Lebensraumfunktion führt« (Hildebrand 2003).

Aus der Sicht des Bodenschutzes gehen einige Untersuchungen der Frage nach, ob und in welchem Umfang eine natürliche Waldbodenregeneration möglich ist. Unterschiedliche Ergebnisse und Folgerungen zeigen, wie schwierig es ist, die Erholungszeiträume veränderter Bodenstrukturen einzuschätzen.

## Literatur zur Bodenregeneration

Die meisten Arbeiten beschränkten sich auf die Entwicklung von Lagerungsdichte und Eindringwiderständen über unterschiedliche Zeitintervalle nach der Belastung. Nur von wenigen Befahrungsversuchen liegen Erfahrungen zur Regeneration von Bodenverformungen unter Berücksichtigung sensitiver Parameter wie Bodenbelüftung oder Wasserleitfähigkeit vor (Schäffer 2004). Erschwerend kommt hinzu, dass selten auf die Art der Strukturveränderungen eingegangen wird.

Das amerikanische Langzeit-Experiment zur Produktionskraft von Böden (LTSP) deckt eine Spanne von Sandböden bis hin zu Tonlehmen ab und arbeitet mit drei Kategorien von nicht verdichtet über mäßig bis stark verdichtet. Turnusmäßig werden Lagerungsdichte und Eindringwiderstand erhoben. Zehn Jahre nach der Belastung zeigen sich bis auf wenige Ausnahmen keine deutlichen Lockerungen. Auf Zusammenhänge mit der Ausgangsdichte und dem Temperaturregime wird jedoch hingewiesen (Powers et. al. 2005). An anderen Beobachtungsflächen wird auf sandigen Lehmen bereits nach fünf Jahren eine signifikante Lockerung festgestellt. Der Regenerationsprozess beginnt an der Oberfläche und verläuft in tieferen Schichten langsamer. Auf Schlufflehmen hingegen sind nur in der obersten Schicht Lockerungen zu erkennen (Page-Dumroese et. al. 2006). Die Autoren weisen auf große, von der Bodenart abhängende Unterschiede hin. Hatchell und Ralston (1971) geben 40 Jahre als Regenerationszeitraum für verdichtete Böden an. Froehlich und McNabb (1984) nennen einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten. Selbst aus kalten Klimaten, in denen Gefrieren und Tauen die Strukturneubildung fördern sollte, berichten Voorhees (1983) und Corns (1988) von minimalen Lockerungseffekten. Letztendlich zeigt eine groß angelegte Studie (19 Böden, 32 Boden-Zeit Kombinationen) im ariden Raum, dass erste Böden nach 70 Jahren regeneriert waren. Lineare und logarithmische Modelle zur Regeneration errechnen Zeiträume von 92 bis 100 bzw. 105 bis 124 Jahren für eine 85-prozentige Wiederherstellung des Ausgangszustandes (Webb 2002). Leider fehlen in all diesen Studien Untersuchungen zu Transferfunktionen für Wasser und Luft.



Abbildung 1: Jede Überfahrt beeinträchtigt die Bodenstruktur. Können sich geschädigte Böden wieder regenerieren?

Prose und Wilshire (2000) stellen auf unterschiedlichen Bodenarten 40 Jahre nach einer Belastung durch Manöver kein Anzeichen einer Lockerung fest. Lagerungsdichte und Eindringwiderstand sind erhöht, Wasserleitfähigkeiten um 55 Prozent niedriger. Mit einer Regeneration ist nach den Autoren frühestens innerhalb mehrerer Dekaden, wenn nicht sogar Jahrhunderten, zu rechnen.

In einer umfangreichen Literaturstudie zu Erholungszeiträumen nach forstlicher Befahrung kommt Arnup (1999) zu dem Schluss, dass Tonlehme je nach Ausgangszustand und Belastungszeitpunkt zwischen fünf und 20 Jahre zur Regeneration benötigen. Einschränkend werden jedoch auch Ergebnisse einiger Autoren, die wesentlich längere Zeiträume ansetzen, erwähnt. Erst 40 Jahre nach der Belastung erreichen die Wasserleitfähigkeitsbeiwerte das Niveau unbelasteter Böden.

In Südaustralien stellt Rab (2004) zehn Jahre nach der Befahrung auf Schlufflehm, Lehmen und Tonlehm unterschiedlich verlaufende Regenerationsprozesse je nach Bodenart, Belastungsintensität und Art der Strukturveränderungen fest. In Sammelgassen auf Schlufflehm fällt die Erholung am geringsten aus. Auf Gassen 2. und 3. Ordnung wurden auf allen anderen Böden die Lagerungsdichten wieder geringer, Grobporenräume stiegen um das Doppelte und mehr. Sie erreichten jedoch noch nicht das Niveau unbelasteter Böden. Croke et. al. 2001 weisen fünf Jahre nach der Belastung grüner Lehme zwar keine signifikant niedrigeren Dichtewerte nach, die Wasserleitfähigkeitswerte jedoch verbesserten sich um das Doppelte und erreichten schon 50 Prozent des Ausgangsniveaus. Auf tongepprägten Böden Westdeutschlands werden in acht Jahre alten Rückegassen bei fünf Zentimetern Bodentiefe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unterhalb eines belüftungsrelevanten Grenzwertes festgestellt (Duft 2005). Gedeutet werden die Ergebnisse als mögliche beginnende Reaggregation, wie sie in der Literatur für Tonböden beschrieben wird. Ein schluffiger Sand im mittleren Pfälzerwald zeigt nach 13 Jahren in den obersten zehn Zentimetern signifikant geringere Lagerungsdichten als nach Befahrung (Schneider et. al. 2003). Auch die Luft- und Wasserleitfähigkeit erholten sich in diesem Bereich deutlich. Sie liegen sogar geringfügig über den Referenzwerten. Die Autoren führen die Lockerung auf intensive Durchwurzelung durch Sukzessionsvegetation zurück. Werner und Werner (2001) weisen darauf hin, dass sich Regenerationsprozesse von Tonlehm je nach Belastungssituation zeitlich und von den Abläufen her unterschiedlich entwickeln. Bei moderater Verdichtung wird die Initialstruktur nach drei Jahren weitestgehend erreicht. Auf Schlufflehm weisen v. Wilpert und Schäffer (2003) anhand der diffusiven Gasleitfähigkeit in der obersten Schicht der Fahrspuren 25 Jahre nach der Belastung eine Verbesserung der Belüftungssituation nach. Diese wirkte sich überproportional auf die Durchwurzelungsintensität und -tiefe aus.

»Regenerationsprozesse verformter Böden hängen offensichtlich stark von (klein)standörtlichen Bedingungen ab, ... Mit Hilfe unechter Zeitreihen konnten zwar Meliorationseffekte erkannt werden, generell dürfte die Zeit zur vollständigen Regeneration in der Regel im Bereich mehrerer Jahrzehnte liegen« (Hildebrand 2003).

Bei der Beurteilung von Regenerationsprozessen ist jedoch auch die Art der Strukturveränderung zu berücksichtigen. Böden, die einer einfachen Verdichtung unterlagen, haben wesentlich bessere Regenerationschancen als solche, bei denen unter der Belastung viskoses Fließen mit deutlicher Randaufwölbung auftrat. Dabei werden die Transferfunktionen auf Grund zerstörter Porenkontinuität unterbunden.

## LWF und TUM untersuchen Struktur-Regeneration schluffig-lehmiger Sande

In einer Kooperationsstudie der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und der Technischen Universität München (TUM) zur Entwicklung bodenstrukturrelevanter Parameter wurde sechs Jahre nach Befahrung mit unterschiedlichen Fahrwerken und Systemkonfigurationen eine Wiederholungsaufnahme gemacht. Um die bodenphysikalischen Parameter zu ermitteln, wurde analog zur Erstuntersuchung 2001 die konventionelle Stechzylinderanalytik eingesetzt.

Weitestgehend homogene Bodenverhältnisse auf einem schluffig-lehmigen Sand über Donaukiesen am südlichen Rand des Tertiärhügellandes ermöglichten Vergleiche von Strukturveränderungen in Folge maschineller Holzernte. Zum Befahrungszeitpunkt lagen die Bodenwassergehalte in fünf bis zehn Zentimetern Tiefe nahe der Fließgrenze und in 15 bis 20 Zentimetern zwischen Ausroll- und Fließgrenze. Damit waren starke Verdichtungen und Einschränkungen der Funktionalität zu erwarten. Bei der Durchforstungsmaßnahme wurden 674 Festmeter (inkl. NH) Fichte auf einer Fläche von sechs Hektar entnommen. Dies entspricht einem Entnahmesatz von 112 Festmeter pro Hektar aus Gassenanlage und Pflege. Die Gassen unterlagen je nach Einzel- oder System-Variante derselben Befahrungsintensität. Zum besseren Verständnis werden in Tabelle 1 die in den Varianten eingesetzten Maschinen kurz beschrieben. Unter System ist die jeweilige Kombination Radharvester – Forwarder oder Raupenharvester – Forwarder zu verstehen.

Tabelle 1: Im Befahrungsversuch 2001 eingesetzte Maschinen

Maschine	Typ und Masse	Fahrwerk
Radharvester	Timberjack 1270 A, 16,5 Tonnen	6-Rad, Nokian, vorne 700 mm, hinten 600 mm
Raupenharvester	Königtiger, 28 Tonnen	Stahlraupe, 600 mm
Forwarder	Rottne Rapid G, 12 Tonnen	8-Rad, Trelleborg, vorne und hinten 700/50 mm

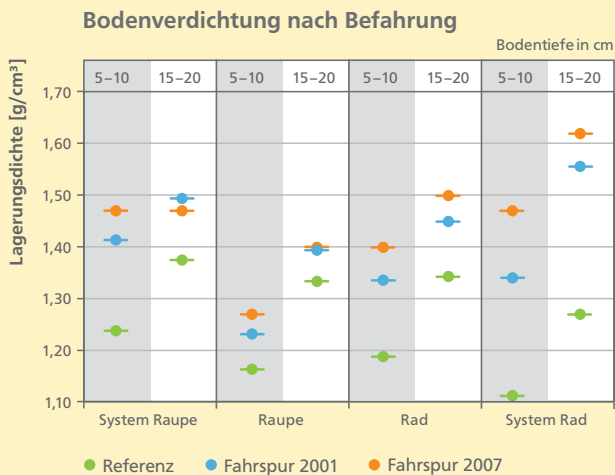


Abbildung 2: Entwicklung der Lagerungsdichte für die Varianten »Ebene«

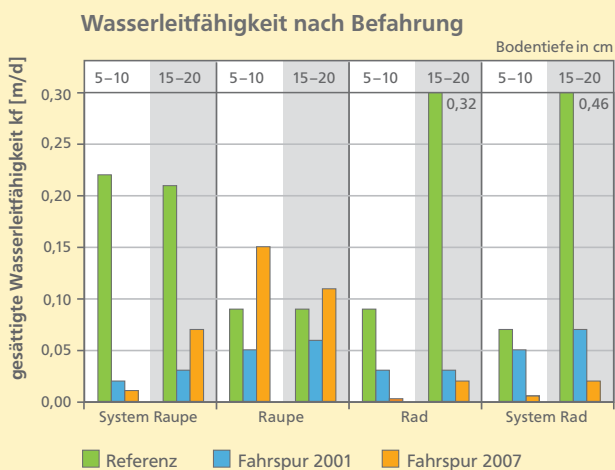


Abbildung 3: Entwicklung der gesättigten Wasserleitfähigkeit für die Varianten »Ebene«

Analog zu den in der Literaturstudie angeführten Befunden werden die Entwicklung der Lagerungsdichte und der Wasserleitfähigkeit als Transferfunktion diskutiert. Die Veränderungen fielen nur unter dem System Rad mit 22 bzw. 28 Prozent drastisch aus. Sie waren 2001 jedoch mit Ausnahme der Werte in der obersten Schicht der Raupenspur signifikant erhöht. Lagerungsdichte und Gesamtporenraum unterliegen in der Ruhezeit von sechs Jahren nur geringsten Veränderungen (Abbildung 2). Da nicht am identischen Punkt beprobt werden konnte, ergaben sich leicht erhöhte Werte und zum Teil größere Streuungen. Dieser Befund deckt sich mit einer Vielzahl der Literaturangaben.

Will man jedoch Regenerationsansätze der Böden aufzeigen, muss man dies anhand positiver Veränderungen der ökologischen Funktionalität versuchen, wie dies z. B. für den Parameter Wasserleitfähigkeit gezeigt werden kann. Obwohl die Tendenzen sehr deutlich ausfallen, wurden 2001 auf Grund großer Streuungen nur in wenigen Fällen signifikante Reduktionen nachgewiesen. In der Wiederholungsaufnahme ergeben sich zumindest für die obere Schicht (fünf bis zehn Zentimeter) mit Reduktionen um über 90 Prozent deutliche Einbußen der Wasserleitfähigkeit (Ausnahme Raupenvariante). Bei 15 bis 20 Zentimeter Tiefe waren und sind die geringeren Werte nur für die Radvarianten statistisch abgesichert. Beim System Raupe deutet sich eine Trendumkehr an. Analog dazu verbesserten sich die Werte in der Spur des Raupenharvesters signifikant um den Faktor 3 bzw. 2. Hier waren zwar 2001 keine Unterschiede zur Referenz zu belegen, jedoch wird auf Grund der Tendenzumkehr von vollständiger Wiederherstellung der Wasserleitfähigkeit ausgegangen. Auch dieses Ergebnis kann entsprechend den Befunden von Croke et. al. 2001 nachvollzogen werden.

**Fazit**

Sechs Jahre nach der Befahrung kann nur in den Fahrspuren des Raupenfahrzeugs von Regeneration gesprochen werden. Bei allen anderen Varianten liegen in fünf bis zehn Zentimetern Tiefe noch signifikant erhöhte Lagerungsdichten und reduzierte Leitfähigkeitswerte vor. In der zweiten Tiefenstufe scheint sich auch in der Spur des Systems Raupe eine Tendenz zur Melioration anzudeuten. Zusammenhänge zwischen Belastungsintensität, Art der Strukturveränderungen und Regenerationsansätzen werden anhand der Ergebnisse aus dieser Studie deutlich.

Weiterhin besteht Forschungsbedarf auf diesem Gebiet, da Strategien zum Bodenschutz bei der Holzernte auch Regenerationsprozesse und -chancen mitberücksichtigen sollten. In der Schweiz und in Süddeutschland laufen zur Zeit Versuche, die biologische Regeneration mittels Bepflanzung besser in Gang zu bringen (Lüscher et al., S. 11–12 in diesem Heft).

**Literatur**

Auf Anfrage beim Verfasser und unter [www.lwf.bayern.de](http://www.lwf.bayern.de)

Dr. Johann Kremer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik der Technischen Universität München. [kremer@forst.wzw.tum.de](mailto:kremer@forst.wzw.tum.de)