

# Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen

Beat Frey Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)\*

## Evaluation of machine-induced soil compaction in forest soils by means of changes in soil bacteria populations

The use of heavy logging machinery in the Swiss forest most often leads to the formation of ruts in which the soil suffers profound and long-lasting damage. In Switzerland the establishment of legal guidelines concerning the measurement of parameters in forest soil physics is being devised, although the necessary scientific bases are still largely lacking. The central question is what degree of structural change in the soil is to be regarded as soil damage. The purpose of this study is to investigate the functional relationship between the physical properties of the soil (compaction), the way these influence vital soil functions and the composition of the bacterial population in the deep ruts. Wheel tracks were divided into three categories, depending on the degree of compaction, by an optical evaluation of easily recognizable morphological characteristics. Soil samples from places showing typical characteristics were investigated for their physical parameters, and genetic analyses of the soil bacteria were carried out. First results show that mechanical pressure on soil by heavy harvesting machines interferes with the balance of gases in the soil of the ruts, and this leads to a shift in the species of soil bacteria present. Anaerobic conditions in the compacted wheel tracks encourage those bacteria adapted to conditions of low oxygen, and increase the production of trace gases (methane, nitrous oxide). The study shows that bacterial populations are sensitive to mechanical pressures on the soil and react to changing habitats. They can thereby be used in an evaluation of the degree of structural damage in the forest soil after the passage of machines.

**Keywords:** physical soil protection, soil compaction, soil quality, soil bacterial communities, genetic profiling  
**doi:** 10.3188/szf.2010.0498

\* Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf, E-Mail [beat.frey@wsl.ch](mailto:beat.frey@wsl.ch)

**B**öden sind wie Luft und Wasser ein wichtiges Umweltkompartiment mit ökologischen und ökonomischen Funktionen (Bafu 2007). Böden sind nicht nur Produktionsflächen, Bauland und Ablagerungsflächen für Müll, sondern erfüllen auch Funktionen als Filter und Speicher für sauberes Trinkwasser, als Lebensraum für Fauna und Flora, als Verankerung für Pflanzen sowie als Kohlenstoffsенке.

Unsere Böden entwickeln sich normalerweise über längere Zeiträume (bis mehrere Tausend Jahre). Zerstört werden sie dagegen sehr viel rascher. Gefahren drohen den Böden von verschiedener Seite. Die grössten Risikofaktoren sind heute Erosion, Verlust von Humus, Verlust der biologischen Vielfalt, Verdichtung, Versalzung, Kontaminationen und Versiegelungen. Die Europäische Union (EU) hat im Rahmen der Bodenschutzstrategie (Commission of the European Communities 2006) eine Bodenschutzrichtlinie ausgearbeitet. Ziel dieser Richtlinie ist es,

den Schutz und den nachhaltigen Gebrauch des Bodens durch die Erhaltung der Bodenfunktionen, die Vorsorge vor Gefährdungen respektive deren Eindämmung sowie durch die Integration von Bodenschutzstandards und -prinzipien zu gewährleisten.

In der Schweiz bezweckt die Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo, SR 814.12) die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Dabei gilt ein Boden als fruchtbar, wenn er eine für seinen Standort typische Lebensgemeinschaft und Bodenstruktur sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist. Die Bodenlebewesen als schützenswerte Lebensgemeinschaft, als Strukturbildner und Garanten für die ungestörte Funktionalität der Böden stehen somit im Zentrum des Bodenschutzes.

Spätestens seit der Aufarbeitung der durch den Sturm Lothar vom 26. Dezember 1999 verursachten Schäden ist der physikalische Bodenschutz, und da-



**Abb 1** Wirkung nachhaltiger Bodenverdichtungen in Waldböden. Kenngrößen des Bodenlufthaushaltes und biologische Parameter (Durchwurzelbarkeit, mikrobiologische Parameter) sind ebenso wichtig für die Charakterisierung von Bodenstrukturstörungen wie bodenphysikalische Parameter (Lagerungsdichte, Porenvolumen).

mit die bodenschonende Holzernte, ein wichtiger Aspekt der Waldbewirtschaftung. Das Befahren mit Forstmaschinen führt auf einem Grossteil der Schweizer Waldböden im Bereich der Fahrspuren zu tiefgreifenden und lang anhaltenden Bodenveränderungen. Die Transportleistung des Bodens für Wasser und Luft wird eingeschränkt, womit wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigt werden (Frey et al 2009, Kremer et al 2009). Der Schutz unserer Waldböden ist wichtig, weil bereits entstandene Beeinträchtigungen nur mit grossem Aufwand zu beheben sind.

In Artikel 6, Absatz 1 der VBBo heisst es: «Wer Anlagen erstellt oder den Boden bewirtschaftet, muss unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und der Feuchtigkeit des Bodens Fahrzeuge, Maschinen und Geräte so auswählen und einsetzen, dass Verdichtungen und andere Strukturveränderungen des Bodens vermieden werden, welche die Bodenfruchtbarkeit langfristig gefährden.» In der Schweiz wird an der gesetzlichen Festlegung von Richt- und Prüfwerten für bodenphysikalische Parameter im Wald gearbeitet (Lüscher et al 2005); die dafür nötigen wissenschaftlichen Grundlagen fehlen allerdings noch weitgehend. Solche Festlegungen setzen die Kenntnis der ganzen Kausalitätskette von der mechanisch verursachten Gefügeveränderung bis zu den in Artikel 2 der VBBo aufgeführten funktionalen Kriterien der Bodenfruchtbarkeit voraus.

Zur Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes fordern sowohl die Praxis als auch Behörden Richtwerte sowie einfache, praktikable Methoden, mit denen sich Beeinträchtigungen der Bodenqua-

lität erkennen lassen. Die Frage, ab welchem Grad der strukturellen Veränderung von einem Bodenschaden gesprochen werden kann beziehungsweise muss, ist bisher vornehmlich unter dem Aspekt ihrer Wirkung auf die Lagerungsdichte und Porosität untersucht worden (Schack-Kirchner et al 2007). Zur Charakterisierung der Bodenstrukturstörungen genügen physikalische Parameter alleine nicht. Kenngrößen des Bodenlufthaushaltes sowie biologische Parameter sind ebenso wichtig (Abbildung 1). Insbesondere gelten heute mikrobiologische Parameter als Indikatoren der Bodenqualität, die kurz-, mittel- und langfristige Veränderungen der Bodenqualität integrierend anzeigen können (Oberholzer & Scheid 2007). Bodenmikroorganismen liefern anhand von Art- und Aktivitätsparametern Informationen zur kombinierten Wirkung von chemischen und physikalischen Bodenverhältnissen, die weit über einzelne chemische oder physikalische Analysen hinausgehen (Frey et al 2008, Lazzaro et al 2008). Häufig werden bodenmikrobiologische Parameter bestimmt, um die Wirkungen von physikalischen Bodenbeeinträchtigungen auf die Bodenmikroorganismen zu untersuchen. Eindeutige Beziehungen zwischen Schädigungen und physikalischen Parametern liessen sich aber nicht ableiten (Shestak & Busse 2005). Ein möglicher Grund könnte sein, dass globale mikrobielle Parameter zu ungenau oder zu wenig empfindlich sind, um Veränderungen der Bodenstruktur auf Bodenmikroorganismen nachzuweisen. Dagegen reagiert die Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften im Boden sensitiv auf befahrungsbedingte Verdichtung (Frey & Lüscher 2008, Frey et al 2009).

## Methoden zur Erfassung der mikrobiellen Diversität

Die mikrobielle Diversität im Boden übertrifft die anderer Habitate bei Weitem. So wird geschätzt, dass ein Gramm Waldboden bis zu 52 000 verschiedene bakterielle Genome (Arten) enthält (Roesch et al 2007). Zur Bestimmung der Diversität im Habitat Boden kann mit Standard-Kultivierungsmethoden von Mikroorganismen nur ein kleiner Teil der genetischen Vielfalt und des Stoffwechselfpotenzials analysiert werden, da über 95% der Bakterien mit künstlichen Wachstumsmedien nicht angereichert werden können.

Erst der Einsatz molekulargenetischer Methoden ermöglichte das Erkennen und die Beschreibung dieser grossen Vielfalt. Dazu wird die Erbsubstanz der Mikroorganismen beispielsweise direkt aus einer Bodenprobe extrahiert. Anschliessend können bestimmte Markergene mittels der Polymerase-Kettenreaktion (PCR-Methode) isoliert und analysiert werden. Ein häufig verwendetes Markergen ist das Gen, welches für die kleine Untereinheit der ribosomalen Ribonukleinsäure (rDNA), d.h. einen Teil des Proteinsyntheseapparates, kodiert. Ein bestimmter Abschnitt auf diesem Gen, nämlich die ubiquitär vorkommenden Sequenzen der 16S-rDNA, eignet sich vorzüglich zur Untersuchung der bakteriellen Vielfalt (Hartmann et al 2005, Frey et al 2006) und zur stammesgeschichtlichen Einordnung der vertretenen Arten (Lazzaro et al 2008, Schönmann et al 2008). Mittels der PCR-Methode werden definierte Abschnitte der 16S-rDNA vervielfältigt. Die PCR-Produkte, homologe DNA-Fragmente unterschiedlicher, artspezifischer Basenzusammensetzung, lassen sich mithilfe von elektrophoretischen Methoden (denaturierende Gradientengelelektrophorese [DGGE] oder terminaler Restriktionsfragmentlängenpolymorphismus [T-RFLP]) analysieren. Zum einen kann die genetische Vielfalt mittels sogenannter genetischer Profile dargestellt und verglichen werden, zum anderen können aber auch die DNA-Sequenzen der isolierten Markergene entschlüsselt und miteinander verglichen werden.

Für eine detaillierte Diversitätsstudie von spezifischen Funktionen einer Lebensgemeinschaft können anstatt des phylogenetischen Markers (16S-rDNA) auch sogenannte funktionelle Markergene untersucht werden. Idealerweise kodieren diese Gene für Enzyme, die zum einen universell in der zu untersuchenden Gruppe vorhanden und zum anderen für die phänotypischen Eigenschaften einer funktionellen Gruppe spezifisch sind. Ein Beispiel für ein solches Enzym ist das *amoA*-Gen, das universell bei den autotrophen Ammonium-Oxidierern vorkommt. Der Nachweis dieses Gens weist auf die Fähigkeit zur Ammoniumoxidation hin (Frey et al 2008).

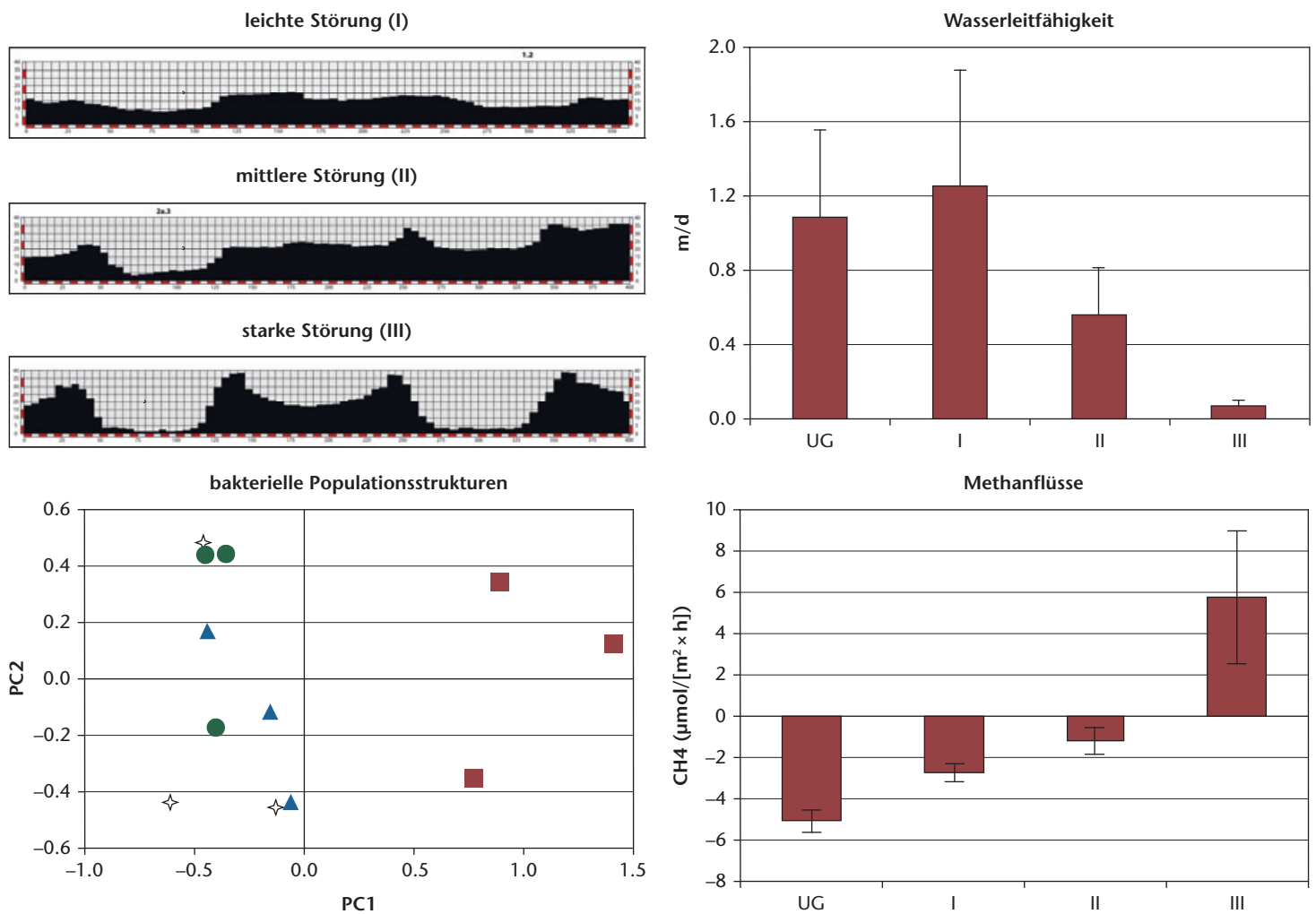
Welcher dieser Ansätze verfolgt wird, hängt von der zu bearbeitenden Fragestellung ab. Sollen zum Beispiel generell Unterschiede zwischen Bodenproben oder unbekannte Auswirkungen auf den Boden untersucht werden, so empfiehlt es sich, allgemeine phylogenetische Markergen-Nachweise zu verwenden. Sollen aber bestimmte funktionelle Gruppen, wie zum Beispiel Methanbakterien in einem Boden, untersucht werden, so werden Nachweise für funktionelle Markergene eingesetzt. Im Folgenden soll dieser Ansatz, wie er in der Forschungseinheit Bodenwissenschaften an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL eingesetzt wird, an einem Beispiel verdeutlicht werden.

## Bodenstrukturveränderung oder Bodenschaden? – Was uns bakterielle Populationsstrukturen sagen

Intensive Wechselwirkungen zwischen biologischen, chemischen und physikalischen Prozessen nach physikalischen Bodenbeeinträchtigungen finden im Boden unter anderem über den Gashaushalt statt. Intakter Boden besteht je zur Hälfte aus fester Substanz und aus luft- oder wasserführenden Poren. Ein beschädigtes und eingeschränktes Porensystem verringert die Transportleistung für Wasser und Luft. Die Feinporen sind häufiger mit Wasser gefüllt. Weil Sauerstoff zehntausendmal langsamer in Wasser als in Luft diffundiert, wird Sauerstoff im Porenraum viel langsamer nachgeliefert. Der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre ist in einem verdichteten Boden, beispielsweise in Fahrspuren, gestört. Dadurch werden bei gegebenen Klima- und Feuchtigkeitsbedingungen der Luft- und Wasserhaushalt im Boden und damit die Lebensbedingungen der Mikroorganismen in Bezug auf O<sub>2</sub>- beziehungsweise



**Abb 2** Fahrversuche in Ermatingen (Kanton Thurgau): Durch das gezielte Anlegen von Fahrspuren in einem kontinuierlich ansteigenden Bodenfeuchtegradienten konnte eine stetig zunehmende Deformation der Bodenstruktur erzeugt werden.

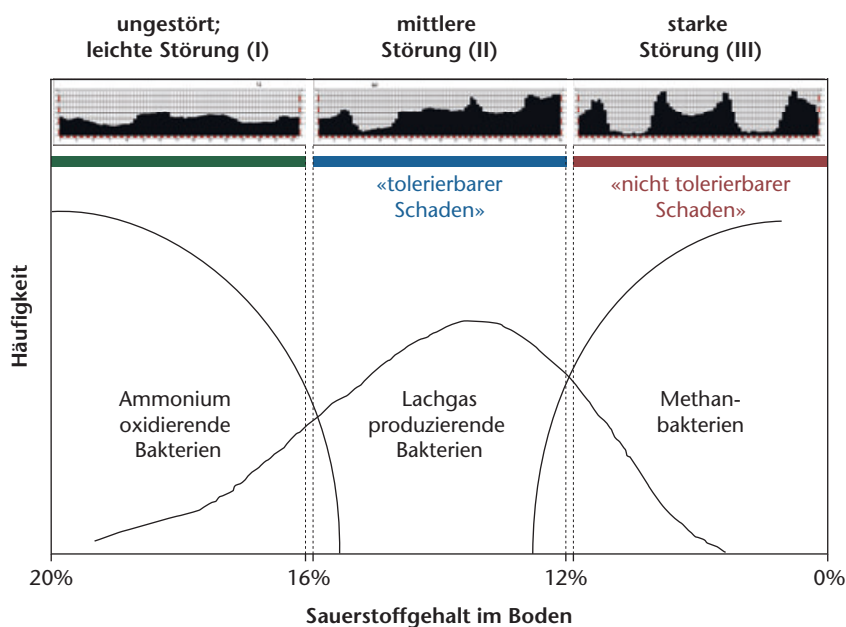


**Abb 3** Zusammenhang zwischen Strukturschaden durch Befahrung, Bodenfunktionen und Zusammensetzung der bakteriellen Populationsstrukturen. Visuelle Typisierung der Fahrspuren nach der Art von Veränderungen im Boden (Abbildung oben links): leichte Störung (I für Spurtyp I); mittlere Störung (Spurtyp II); starke Störung (Spurtyp III). Ein schwere Bodenbeeinträchtigung (Spurtyp III) zeichnet sich durch eine stark reduzierte Wasserleitfähigkeit (Abbildung oben rechts), erhöhte Methanemissionen (Abbildung unten rechts) und veränderte bakterielle Populationsstrukturen (Abbildung unten links) in den Fahrspuren aus. Die Zusammensetzung der bakteriellen Populationsstrukturen zeigt in Abhängigkeit vom Spurtyp stark unterschiedliche Cluster in der Hauptkomponentenanalyse (PC1; PC2). Spurtypen I (grüne Kreise) und II (blaue Dreiecke) liegen eng bei den Punkten aus dem ungestörten Referenzbereich (Sterne respektive UG), davon unterscheiden sich die Populationen im Spurtyp III (rote Quadrate) deutlich.

CO<sub>2</sub>-Gehalt der Bodenluft und das Redoxpotenzial beeinflusst. Bei sauerstofflimitierenden Bedingungen kommt es zu veränderten mikrobiellen Prozessen im Boden, indem die Energiegewinnung der Mikroorganismen nicht durch Verbrennungs-, sondern vor allem durch Reduktionsprozesse erfolgt. Dies spiegelt sich in den vom Boden an die Atmosphäre abgegebenen Gasen (Teepe et al 2004) und der Zusammensetzung der mikrobiellen Lebensgemeinschaften im Boden (Frey & Lüscher 2008) wider. Die Letztere kann direkt mithilfe der ribosomalen Markergene für Bakterien bestimmt werden (Frey et al 2009). Im Gegensatz zur Sauerstoffkonzentration in der Bodenluft, die hoch variabel auf eine Vielzahl verschiedenster Einflüsse (z.B. Schneebedeckung) anspricht, reagieren Bakteriengemeinschaften deutlich träger (nach zwei bis vier Wochen) und reflektieren somit das «mittlere» Bodengasmilieu ohne Beeinflussung durch kurzfristige Ereignisse.

Wir haben im Wald unter kontrollierten Bedingungen Fahrversuche durchgeführt, die Verän-

derungen in den Böden minutiös mit Daten erfasst und mögliche Folgen skizziert (Frey & Lüscher 2008; Kremer et al 2009). Durch das gezielte Anlegen von Fahrspuren in einem kontinuierlich ansteigenden Bodenfeuchte-Gradienten konnte eine stetig zunehmende Deformation der Bodenstruktur erzeugt werden (Abbildung 2). Mithilfe einer kombinierten bodenphysikalisch-bodenmikrobiologischen Beprobung im engen Probenraster kann der lokale Übergang von einer leichten bodenstrukturellen Veränderung hin zu einem «Bodenschaden» festgelegt werden. Die Untersuchungen auf den Pilotflächen Messen (Kanton Solothurn), Ermatingen (Kanton Thurgau) und Heiteren (Kanton Bern) zeigen, dass die bakteriellen Populationsstrukturen unter Fahrspuren des Typs I (leichte strukturelle Bodenveränderung) und des Typs II (mittlere strukturelle Bodenveränderung) keine deutlichen Unterschiede zu den ungestörten Referenzproben aufweisen, während die Spuren des Typs III (starke strukturelle Bodenveränderung) sich klar von den ungestörten Bo-



**Abb 4** Ein möglicher Ansatz zur Bewertung von mechanischen Bodenveränderungen mittels bakterieller Populationsstrukturen. Oben: visuelle Typisierung der Fahrspuren nach der Art von Veränderungen im Boden: ungestört; leichte Störung (Spurtyp I); mittlere Störung (Spurtyp II); starke Störung (Spurtyp III). Unten: Veränderung von Bakterienpopulationen mit abnehmendem Sauerstoffgehalt (resp. zunehmender Verdichtung) im Boden. Tolerierbarer Schaden: Zunahme von lachgasproduzierenden Bakterien infolge mangelhafter Durchlüftung des Bodens (Bodenschaden mit Regenerationspotenzial). Nicht tolerierbarer Schaden: dauerhafte Verschiebung des Bodenmilieus von aerob nach anaerob, gekennzeichnet durch eine starke Zunahme von Methanbakterien in Fahrspuren (Bodenfruchtbarkeit langfristig eingeschränkt; ohne Regenerationspotenzial).

denproben absetzen (Abbildung 3). Diese Befunde stehen in engem Zusammenhang mit nachweisbaren Bodenstrukturveränderungen und einer drastischen Reduktion der Wasserleitfähigkeit.

Während in einer noch intakten Bodenstruktur aerobe Bakterien mit  $\text{CO}_2$  als Atmungsprodukt vorherrschen, kommt es bei mittlerer (Typ II) und starker (Typ III) struktureller Bodenveränderung mit eingeschränkten Bodenfunktionen zu einer Verschiebung hin zu mehr anaeroben Populationen (Abbildung 4). Denitrifizierende und methanogene Bakterien gehören zu den anaeroben chemoheterotrophen Mikroorganismen, die sich durch den Abbau von organischer Substanz ernähren, aber anstatt Sauerstoff alternative Elektronenakzeptoren für die Energiegewinnung verwenden. Im Allgemeinen werden die Elektronenakzeptoren in einer Reihe des abnehmenden Redoxpotenzials (als Mass der reduktiven Umgebung) von der aeroben Sauerstoffatmung über die Nitratatmung (Denitrifizierer mit Freisetzung von  $\text{N}_2\text{O}$  und  $\text{N}_2$ ) und die Mangan- und Eisenoxidatmung (verursacht die bekannten Bleichungen), Sulfatatmung (Schwefelwasserstoffgeruch) bis zur Fermentation mit Methanfreisetzung angeordnet.

Der Einsatz von spezifischen, funktionellen Markergenen zeigte ein erhöhtes Vorkommen von denitrifizierenden Bakterien in verdichteten Fahrspuren (Spurtyp II) an, die in den verformten Böden er-

höhte Emissionen von treibhausrelevantem Lachgas verursachen. Die für die Methanfreisetzung notwendigen Bedingungen können nur in einer durch viskoses Fließen verformten, völlig sauerstofffreien Fahrspur (Spurtyp III) erreicht werden. Unter diesen sehr starken strukturellen Deformationen verschwinden letztlich alle aeroben Stämme und werden von Methanbakterien ersetzt, die vorwiegend in vernässeten Böden vorkommen (Abbildung 4). Diese veränderten bakteriellen Populationsstrukturen spiegeln sich auch in der Zusammensetzung der vom Boden an die Atmosphäre abgegebenen Gase wider (Abbildung 3). So nimmt in den verformten Böden die Emission von treibhausrelevantem Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) und bei extrem reduzierenden Bedingungen (Spurtyp III) jene von Methan ( $\text{CH}_4$ ) zu.

Die Zunahme der Methanbakterien in stark verformten Böden (Spurtyp III) ist also der zweifelsfreie Anzeiger für einen «Bodenschaden» mit negativen Folgen für die Bodenfruchtbarkeit (Abbildung 4). Von einem nicht tolerierbaren «Bodenschaden» kann dann zweifelsfrei gesprochen werden, wenn sich das Bodenmilieu aufgrund erheblicher Strukturveränderungen dauerhaft von aerob nach anaerob verschoben hat. Bei einer mittleren Störung (Spurtyp II) gehen wir davon aus, dass sich der Boden mittelfristig aufgrund des natürlichen, standortspezifischen Regenerationspotenzials erholen wird. Ein solcher Schaden ist somit zeitlich begrenzt und tolerierbar. Ableitend von diesen Erkenntnissen eignen sich bodenbakterielle Untersuchungen hervorragend zur Ermittlung von sauerstofflimitierenden Bodenbedingungen. An ihnen können alle bodenphysikalischen und bodenstrukturellen Methoden und Parameter sowie die typische Spurausprägung «kalibriert» werden.

Aufgrund der Bedeutung dieses Themas im Hinblick auf den Bodenschutz und die Emission klimarelevanter Gase aus Waldböden ist eine vertiefte Forschung zu den Zusammenhängen zwischen physikalischen Beeinträchtigungen und den Folgen für die bakteriellen Populationen notwendig. Nachdem ein hinreichend gutes, jedoch nur generelles Prozessverständnis existiert, können die Schlüsselorganismen im Stickstoff- und Methankreislauf für die verschiedenen Intensitäten der bodenstrukturellen Deformation zur Ableitung von Schwellenwerten untersucht werden. ■

Eingereicht: 15. März 2010, akzeptiert (mit Review): 22. September 2010

## Literatur

- BAFU (2007) Bodenschutz Schweiz – ein Leitbild. Bern: Bundesamt Umwelt. 8 p.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2006) Thematic strategy for soil protection. Brussels: European Commission, COM(2006)231. 12 p.

- FREY B, STEMMER M, WIDMER F, LUSTER J, SPERISEN C (2006) Microbial characterization of a heavy metal-contaminated soil in a model forest ecosystem. *Soil Biol Biochem* 38: 1745–1756.
- FREY B, LÜSCHER P (2008) Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. Freising: Bayer Landesanstalt Wald-Forstwirtschaft, LWF Aktuell 67: 5–7.
- FREY B, PESARO M, RÜDT A, WIDMER F (2008) Dynamics of bacterial communities in bulk and poplar rhizosphere soil contaminated with heavy-metals. *Environ Microbiol* 10: 1433–1449.
- FREY B ET AL (2009) Compaction of forest soil with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *Eur J Soil Biol* 45: 312–320.
- HARTMANN M, FREY B, KÖLLIKER R, WIDMER F (2005) Semi-automated genetic analyses of soil microbial communities: comparison of T-RFLP and RISA based on descriptive and discriminative statistical approaches. *J Microbiol Meth* 61: 349–360.
- KREMER J, FREY B, LÜSCHER P (2009) Bodenstrukturveränderung oder Bodenschaden – wo liegt die Grenze? Freiburg: Univ Freiburg, Ber Freibg Forstl Forsch 79: 39–45.
- LAZZARO A, WIDMER F, SPERISEN C, FREY B (2008) Identification of dominant phylotypes in a cadmium-treated forest soil. *FEMS Microbiol Ecology* 63: 143–155.
- LÜSCHER P, THEES O, FRUTIG F, SCIACCA S (2005) Physikalischer Bodenschutz im Wald als Teil der Arbeitsqualität. *Bull Bodenkd Ges Schweiz* 28: 11–14.
- OBERHOLZER HR, SCHEID S (2007) Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Bern: Bundesamt Umwelt, Umwelt-Wissen 0723. 78 p.
- ROESCH LFW ET AL (2007) Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity. *ISME J* 1: 283–290.
- SCHACK-KIRCHNER H, FENNER PT, HILDEBRAND EE (2007) Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferrasol under native forest. *Soil Use Manage* 23: 286–293.
- SCHÖNMANN S ET AL (2008) Development and validation of a prototype 16S rRNA-based taxonomic microarray for members of the genus Burkholderia. *Environ Microbiol* 11: 779–800.
- SHESTAK CJ, BUSSE MD (2005) Compaction alters physical but not biological indices of soil health. *Soil Sci Soc Am J* 69: 236–246.
- TEEPE R, BRUMME R, BEESE F, LUDWIG B (2004) Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. *Soil Sci Soc Am J* 68: 605–611.

## Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen

Das Befahren mit Forstmaschinen führt auf einem Grossteil der Schweizer Waldböden im Bereich der Fahrspuren zu tiefgreifenden und lang anhaltenden Bodenveränderungen. In der Schweiz wird an der gesetzlichen Festlegung von Richt- und Prüfwerten für bodenphysikalische Parameter in Waldböden gearbeitet; die dafür nötigen wissenschaftlichen Grundlagen fehlen allerdings noch weitgehend. Die Frage, ab welchem Grad der strukturellen Veränderung von einem Bodenschaden gesprochen werden kann, ist zentral. Das Ziel dieser Studie ist es, die funktionellen Beziehungen zwischen den physikalischen Bodeneigenschaften (Verdichtung), den von ihnen beeinflussten Lebensbedingungen sowie der Zusammensetzung von bakteriellen Populationen in Fahrspuren zu untersuchen. Vorhandene Fahrspuren wurden anhand optisch gut zu erkennender morphologischer Merkmale in drei unterschiedlich stark verdichtete Spurtypen eingeteilt. Aus Probepunkten mit typischer Ausprägung wurden bodenphysikalische Parameter ermittelt und genetische Analysen von Bodenbakterien durchgeführt. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass eine mechanische Bodenbelastung mit schweren Erntemaschinen den Gashaushalt in Fahrspuren stört, was folglich zu einer Artenverschiebung unter den Bakterienpopulationen führt. Anaerobe Verhältnisse in verdichteten Fahrspuren fördern die an sauerstoffarme Verhältnisse angepassten Bakterienarten und erhöhen die Produktion von Spurengasen (Lachgas, Methan). Die Studie zeigt, dass bakterielle Populationen empfindlich auf mechanische Bodenbelastungen reagieren, womit sie helfen, Strukturschäden in Waldböden nach Befahrung zu beurteilen.

## Evaluation de l'altération du sol due à la circulation d'engins par le biais de populations bactériennes

L'utilisation de machines forestières est, dans une grande partie des forêts suisses, à l'origine d'altérations profondes et durables du sol au niveau des ornières. En Suisse, il est actuellement prévu de fixer légalement des seuils et valeurs limites pour des paramètres physiques du sol forestier. Les bases scientifiques nécessaires manquent toutefois largement à l'heure actuelle. La question centrale est de déterminer à partir de quel degré d'altération structurelle on doit parler de dégât au sol. L'objectif de cette étude consiste à analyser les relations fonctionnelles entre les paramètres physiques du sol (compactage) sur les conditions de vie et la composition de la faune bactérienne dans les ornières. Ces dernières ont été classées en trois types présentant des degrés de compactage différents selon des critères morphologiques facilement identifiables à l'œil nu. Dans des échantillons caractéristiques, les paramètres pédologiques ont été déterminés et une analyse génétique de la faune bactérienne a été effectuée. Les premiers résultats soulignent que des contraintes mécaniques infligées au sol par de lourdes machines de récolte perturbent la circulation des gaz dans le sol des ornières, ce qui se traduit par une modification de la faune bactérienne. Les conditions anaérobiques dans le sol tassé des ornières favorisent en effet les espèces bactériennes adaptées aux milieux pauvres en oxygène et augmentent la production des gaz tels que le protoxyde d'azote ou le méthane). L'étude démontre que la faune bactérienne réagit de façon sensible aux contraintes mécaniques imposées au sol. Son analyse peut donc contribuer à évaluer pour les sols forestiers les dégâts structurels consécutifs au passage d'engins.