

Hochschule Osnabrück
University of Applied Sciences

**Bodenschadverdichtung-
Vermeidung Regeneration Überwachung**

Beiträge zum Diskussionsforum Bodenwissenschaften
am 26.Oktober 2012

Hochschule Osnabrück
Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Heft 12

Impressum

Diskussionsforum Bodenwissenschaften, Heft 12 (2012):
Bodenschadverdichtung- Vermeidung, Regeneration, Überwachung

Herausgeber:

Fakultät Agrarwissenschaften & Landschaftsarchitektur

Hochschule Osnabrück

Am Krümpel 31

49090 Osnabrück

Telefon: 0541-969-5110

Telefax: 0541-969-5170

E-Mail: al@hs-osnabrueck.de

Internet: <http://www.al.hs-osnabrueck.de>

Redaktion und Layout:

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ (H-C.Fruend@hs-osnabrueck.de)

Prof. Dr.-Ing. Olaf Hemker (O.Hemker@hs-osnabrueck.de)

Dipl.-Ing. (FH) Petra Große Erdmann

Corinna Nieland

Für den Inhalt der Einzelbeiträge sind die Autoren verantwortlich.

Vorwort

Knapp die Hälfte eines guten Bodens besteht aus Poren, also Hohlräumen. Mit der steigenden Mechanisierung in der Land- und Forstwirtschaft steigt die Wahrscheinlichkeit von Bodenverdichtungen. Diese nehmen das Ausmaß von Schadverdichtungen an, wenn die Störung des Porensystems zu einer Beeinträchtigung der ökologischen Bodenfunktionen führt.

In der Tagung soll nach einer Bestandsaufnahme des Ausmaßes problematischer Bodenverdichtungen in landwirtschaftlichen Böden und im Wald der Frage nachgegangen werden, ob und wie Bodenverdichtungen wieder rückgängig gemacht werden können. Schließlich sollen Wege zur Vermeidung von Bodenschadverdichtungen aufgezeigt werden. Dabei werden landwirtschaftliche Böden und Waldböden gleichermaßen betrachtet.

Osnabrück, Oktober 2012

Prof. Dr. Heinz-Christian Fründ

Prof. Dr.-Ing. Olaf Hemker

Anschriften der Referenten

- Stephan Marahrens** Umweltbundesamt Dessau-Roßlau
Fachgebiet II 2.7 Bodenzustand, Bodenmonitoring
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: 0340-2103 2396
e-mail: Stephan.Marahrens@uba.de
www.umweltbundesamt.de/boden-und-altlasten/index.htm
- PD Dr. Klaus v.Wilpert** Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg
Abt. Boden und Umwelt
79100 Freiburg, Wonnhaldestr. 4
Tel.: 0761-4018-173
e-mail: klaus.wilpert@forst.bwl.de
www.fva-bw.de
- Christine Meyer** Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research
WSL
Soil Sciences
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
Switzerland
Phone +41-44-739 28 27
e-mail: christine.meyer@wsl.ch
- Dr. Gerhard Dumbeck** RWE POWER AG
Abteilung Rekultivierung Land- und Forstwirtschaft
Friedrich-Ebert-Str. 104
50374 Erftstadt
Tel.: 02235/9830021021
e-mail: gerhard.dumbeck@rwe.com
- PD Dr. habil. Joachim Brunotte** Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)
Bundesforschungsanstalt für Ländliche Räume, Wald und Fischerei
Inst. für Agrartechnologie und Biosystemtechnik (AB)
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
e-mail: joachim.brunotte@vti.bund.de
- Dr. Herbert Borchert** Abteilungsleiter Forsttechnik, Betriebswirtschaft und Holz
Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 1, D-85354 Freising
Tel.: 08161-71-4640
e-mail: Herbert.Borchert@lwf.bayern.de

Inhalt

Bewertung und Ausmaß von Bodenverdichtungen für die landwirtschaftliche Produktionsfläche in Deutschland	1
<i>Stephan Marahrens</i>	
Bodenverdichtung in der Forstwirtschaft	16
<i>PD Dr. Klaus v. Wilpert</i>	
Einsatz von Schwarzerlen zur Regeneration von mechanisch verdichteten Waldböden	27
<i>Christine Meyer</i>	
Umgang mit Bodenverdichtungen bei der Wiederherstellung von Lössböden im rheinischen Braunkohlenrevier	39
<i>Dr. Gerhard Dumbeck</i>	
Bodenverdichtung in der Landwirtschaft	51
<i>PD Dr. habil. Joachim Brunotte</i>	
Bewertung und Vermeidung von Bodenschadverdichtungen im Wald	62
<i>Dr. Herbert Borchert</i>	

Bodenverdichtung in der Forstwirtschaft

Klaus v. Wilpert, Jürgen Schäffer

Für die Berücksichtigung der Belange des Bodenschutzes bei zunehmender Mechanisierung von Forstbetriebsarbeiten müssen Qualitätsnormen definiert und in verbindliche Handlungsanweisungen überführt werden. Um eine Akzeptanz in der Praxis zu erreichen, muss ein Befahrungskonzept neben dem Bodenschutz auch ökonomische und technische Aspekte berücksichtigen. Aufgrund der Prognoseunsicherheit eines ökologischen Schadenseintritts wird zur Bodenvorsorge eine Trennung von Produktions- und Befahrungsflächen und Minimierung des Anteils befahrener Flächenanteile vorgeschlagen. Seit etwa 40 Jahren werden schwere Maschinen bei der Waldbewirtschaftung eingesetzt. Das Einsatzspektrum von Forstmaschinen wurde im Laufe der zurückliegenden Jahrzehnte zunehmend erweitert und umfasst heute neben der Rückung auch die mechanisierte Aufarbeitung im Bestand. Die Leistungsfähigkeit und Maschinengewichte stiegen in der Folge drastisch an, Fahrzeuggewichte einschließlich Ladung liegen heute nicht selten über 30 t.

Der Waldboden stellt ein weitgehend ungeschütztes Widerlager für die statischen und dynamischen Kräfte dar, die während des Maschineneinsatzes auftreten. Unter mitteleuropäischen Verhältnissen übersteigt die Krafteinwirkung in aller Regel die vom Mineralboden mobilisierbaren Scherkräfte. Die daraus resultierende Bodenverformung lässt sich durch einfache bodenphysikalische Kenngrößen wie z.B. die Lagerungsdichte oder die Porengrößenverteilung beschreiben. Diese Parameter sind aber nur bedingt geeignet die Beeinträchtigung des Wasser- und Gashaushaltes oder aber der Wurzelraumfunktion zu beschreiben. So ist in verformten Böden die Entsorgung von Kohlendioxid gehemmt und die Sauerstoffversorgung der Wurzeln eingeschränkt. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Intensität der Wurzelraumerschließung durch die physiologisch aktiven Feinwurzeln aus. Die Feinwurzel-dichte stellt daher eine für die Beurteilung der Auswirkungen von befahrungsbedingten Strukturveränderungen geeignete ökologische Monitoringgröße dar.

Ökologische Folgen der Befahrung von Waldböden

Beeinträchtigung der Bodenbelüftung

Für ein optimales Wurzelwachstum müssen Wurzelspitzen gleichzeitig Anschluss an alle drei Komponenten des Bodens haben. Die Festsubstanz ist der mittel- und langfristige Speicher für Nährelemente und ermöglicht die Verankerung des Wurzelwerks zur Stabilisierung der oberirdischen Biomasse. Über die Bodenlösung wird der Wasser- und Nährstoffbedarf gedeckt. Die Bodenluft versorgt die atmungsaktiven Wurzeln mit Sauerstoff und dient zugleich der Entsorgung des bei der Atmung gebildeten Kohlendioxids. Der für das Wurzelwachstum essentielle Durchdringungsbereich der Komponenten muss für die Gewährleistung stabiler Waldbestockungen tief in den Mineralboden hinein reichen.

Als zentraler Schlüsselparameter für die Charakterisierung der ökologischen Folgen von Bodenstrukturstörungen kann die Belüftung angesehen werden (Hildebrand, 1986, 1994, Gaertig et al., 1999, Gaertig, 2001). Die maximale Verformung, die durch Holzerntemaschinen verursacht wird, findet im oberen Mineralboden statt. Da der Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre zwingend über die Bodenoberfläche abgewickelt werden muss, haben oberflächliche Veränderungen der Bodenstruktur tief reichende Folgen für die Bodenbelüftung und die Ausbreitungsmöglichkeiten von Wurzeln. Im Boden erfolgt der Gastransport überwiegend aufgrund von Partialdruckunterschieden, d.h. auf diffusivem Weg. Die Flussrate ist abhängig vom antreibenden Konzentrationsgradienten und dem Diffusionskoeffizienten (D_s), der als Proportionalitätsfaktor die Behinderung des Gastransports durch den Boden charakterisiert. Der

relative scheinbare Gasdiffusionskoeffizient (D_s/D_0) beschreibt, um wie viel die Diffusion durch einen Bodenkörper im Vergleich zur Diffusion in der freien Atmosphäre reduziert ist. Neben dem Porenvolumen sind weniger der Porendurchmesser, sondern vielmehr die Porenkontinuität und die Tortuosität Strukturparameter, die die Effektivität des Gasaustausches zwischen Boden und Atmosphäre bestimmen.

Auf der Befahrungsversuchsfläche Weil im Schönbuch wurde die Beeinträchtigung von Bodenfunktionen nach einer sechs Jahre zurückliegenden Befahrung mit Maschinenaggregaten, die typischerweise in Durchforstungen eingesetzt werden (Gesamtgewichte von über 15 t), untersucht. Es ist davon auszugehen, dass nach dieser Zeit sich der bodenphysikalische Zustand und die Wurzelraumerschließung in einem Gleichgewicht befinden und eine Regeneration der Porenraumstruktur noch nicht stattgefunden hat. Der Oberboden in der Fahrspur und im Zwischenspurbereich wirkt immer noch als "Schleuse" für den Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre. Eine visuelle Folge dieser Belüftungsstörung ist ein Auftreten von anaeroben oder teilanaeroben Phasen, die sich profilmorphologisch in Form von "Minipseudogleyen" in den obersten 10 bis 20 cm Bodentiefe in der Fahrspur ausprägen.

Abbildung 1 zeigt für diese Versuchsfläche Tiefenprofile der relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten, die mit der von Frede (1996) beschriebenen Kammermethode an fünf 100 cm³-Stechzylinderproben pro Tiefenstufe und Befahrungssituation bestimmt wurden. Die Messungen der D_s -Werte wurden bei einer Wasserspannung von -60 hPa durchgeführt, die weiten Grobporen (Durchmesser >50 µm) waren in diesem Zustand entwässert und standen für die Belüftung zur Verfügung. Neben der im Gelände eindeutig an der Spureintiefung erkennbaren Fahrspur wurde der zwischen den beiden Fahrspuren liegende Zwischenspurbereich und der ca. 50 bis 80 cm außerhalb der Fahrspur liegende und in den angrenzenden Bestand vermittelnde Randbereich beprobt. Signifikante Unterschiede zwischen den Fahrspursituationen, die mit dem multiplen nicht parametrischen Dunn-Test auf einem Niveau von $p < 0.05$ ermittelt wurden, sind mit Kleinbuchstaben dargestellt ($a < b < c$). Die horizontalen Linien entsprechen der einfachen Standardabweichung. Standortlich handelt es sich bei dem Substrat um einen Luvisol (aus Löss über Angulatensandstein, Skelettgehalt im schluffig-lehmigen A_n - und E-Horizont unter 10%, Übergang in den tonig-lehmigen B_t zwischen 40 und 50 cm).

Die höchsten D_s/D_0 -Werte im Oberboden wurden auf der Kontrollfläche festgestellt. In keiner der vier untersuchten Tiefenstufen im Bereich des Fahrspurrandes war ein signifikanter Unterschied zur Kontrollfläche zu belegen. Um den Faktor 10 geringere Diffusionswerte charakterisieren dagegen den Oberboden in der Fahrspur, das Tiefenprofil zeigt bis in die Tiefe von 34 cm im Gegensatz zur Kontrolle keinen ausgeprägten Tiefengradienten. Im Zwischenspurbereich liegen die D_s/D_0 -Werte auf einem deutlich niedrigeren Niveau als im unbefahrenen Bestand bzw. der Fahrspurrandsituation. Erst in 30 bis 34 cm Bodentiefe sind die Diffusionswerte zwischen den untersuchten Straten wieder vergleichbar. Diese Tiefenstufe stellt damit die Untergrenze der verformten Bodenzone dar.

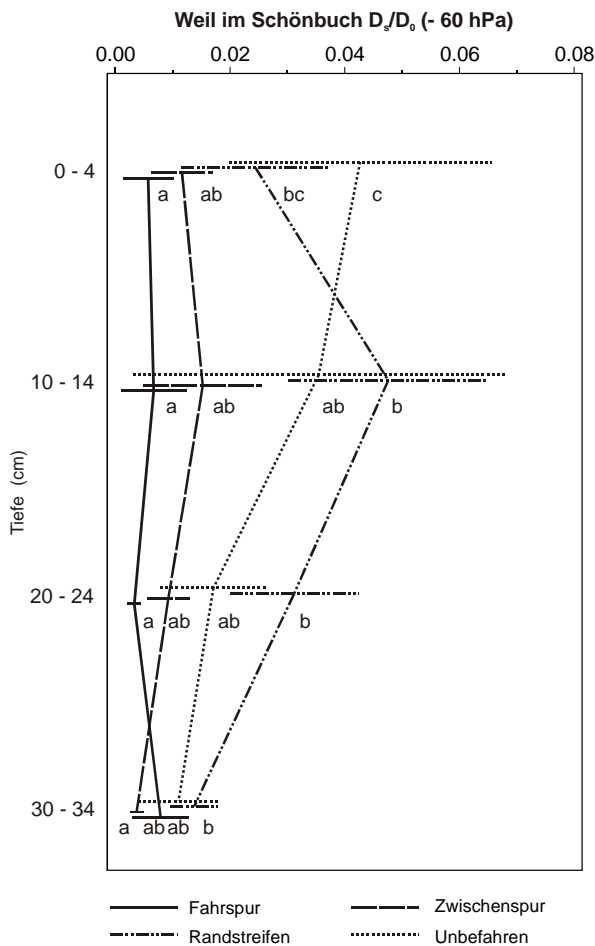


Abbildung 1: Tiefenprofile der relativen scheinbaren Gasdiffusionskoeffizienten (D_s/D_0) bei einer Wasserspannung von -60 hPa für die Fahrspursituationen in Weil im Schönbuch (6 Jahre nach Befahrung).

Wenn der Gasaustausch durch eine befahrungsbedingte Bodenverformung im Bereich der Bodenoberfläche gestört ist, so führt dies in erster Linie zu einer Erhöhung der CO_2 -Konzentration in der Bodenluft. In einem mehr oder weniger schmalen Elastizitätsbereich kann infolge des erhöhten Konzentrationsgefälles zur Außenluft die Entsorgung von CO_2 begünstigt werden. In diesem Fall ist die biologische Aktivität des Bodens nicht signifikant beeinträchtigt. In der Regel ist die diffusive Gasdurchlässigkeit des

Bodens nach Befahrung jedoch so stark vermindert, dass diese negative Rückkopplung außer Kraft gesetzt ist und die CO_2 -Entsorgung und O_2 -Nachlieferung gestört sind. Damit sinkt die Respirationsrate des Bodens. Dies beeinflusst die strukturschaffende Aktivität von Bodenorganismen und vor allem den besonders Energie konsumierenden Vorgang des Wurzelwachstums.

Abbildung 2 zeigt für zwei Quertransekte über Fahrtrassen einer bereits 14 Jahre zurück liegenden Befahrung auf einem grusigen Cambisol (Skelettgehalt im Oberboden zwischen 25% und 50%) die Erhöhung der CO_2 -Konzentrationen in der Fahrspur in einer Bodentiefe von 10 cm. In den Fahrspuren lagen die CO_2 -Konzentrationen zwischen 0.7 Vol.% und 1.6 Vol.%, die mittleren CO_2 -Konzentrationen sind im Vergleich zur unbefahrenen Referenzsituation (0.3 Vol.%) um den Faktor 3 bis 4 erhöht. Dies bedeutet, dass selbst auf diesem weniger befahrungssensitiv eingestuft, skelettreicheren Substrat Beeinträchtigungen der diffusiven Gasleitfähigkeit über mehr als ein Jahrzehnt erhalten bleiben.

**CO_2 - Konzentrationen in 10 cm Bodentiefe
14 Jahre nach Befahrung**

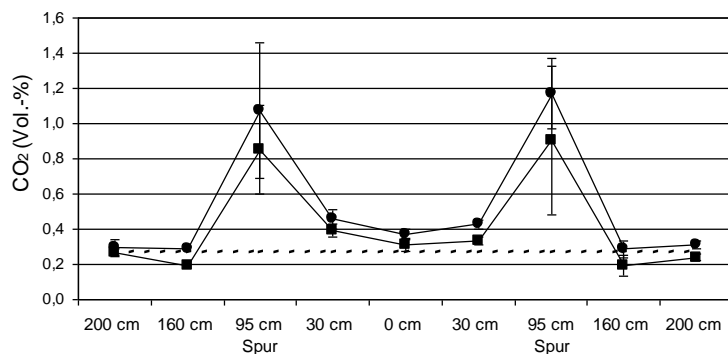


Abbildung 2: CO_2 -Konzentration in der Bodenluft in einer Bodentiefe von 10 cm. Die Messungen erfolgten 14 Jahre nach der Befahrung auf einer grusigen Braunerde. Gestrichelte Linie: Referenzwert für die unbefahrene Bestandessituation.

Auswirkungen der Befahrung auf die Wurzelraumfunktion

Im Vergleich zu den weiteren Baumkompartimenten ist der Sauerstoffbedarf von Baumwurzeln insbesondere der physiologisch aktiven Feinwurzeln überproportional hoch. Hildebrand (1986, 1987) fand eine negative Korrelation zwischen zunehmender Lagerungsdichte und dem Wachstum von Buchenkeimlingen sowie der Feinwurzelproduktion bei Fichte. Er interpretierte diesen Befund als Folge reduzierter Sauerstoffverfügbarkeit. Durch künstliche Sauerstoffanreicherung konnte Murach et al. (1993) höhere Wachstumsraten der Feinwurzeln im tieferen Mineralboden erreichen. In einem Laborversuch zeigten Qi et al. (1994), dass die Wurzelwachstumsraten von Douglasiensämlingen mit zunehmenden CO₂-Konzentrationen exponentiell abnehmen. In einem Vergleich von bodenstrukturgestörten Eichenbeständen mit ungestörten Referenzsituationen fanden Gaertig et al. (2001), dass eine Verringerung des relativen scheinbaren Diffusionskoeffizienten von 0.1 auf 0.01 an der Bodenoberfläche zu einer signifikanten Verringerung der Feinstwurzeldichten bis in eine Bodentiefe von 70 bis 80 cm führte.

Es ist davon auszugehen, dass in Folge der über Jahre hinweg verringerten Belüftung des Bodens im Bereich der Fahrspur und auch im Zwischenspurbereich auf der Versuchsfäche Weil im Schönbuch eine Hemmung der Wurzelraumschließung eingetreten ist und dies quantitativ an verringerten Feinwurzelintensitäten nachgewiesen werden kann.

Abbildung 3 zeigt die Feinwurzelichten (Durchmesser < 2 mm, gezählt in einem Raster von 4 * 4 cm) über ein bestockungsfreies Fahrspurtransekt von 4 m Breite und 60 cm Tiefe. Die Distanz des Transektes zu den nächstliegenden Fahrtrassenrandbäumen betrug ca. 1m. An diesem Transekt wurden auch die Stechzylinderproben für die Bestimmung der Diffusionskoeffizienten, die in Abbildung 1 dargestellt sind, entnommen.

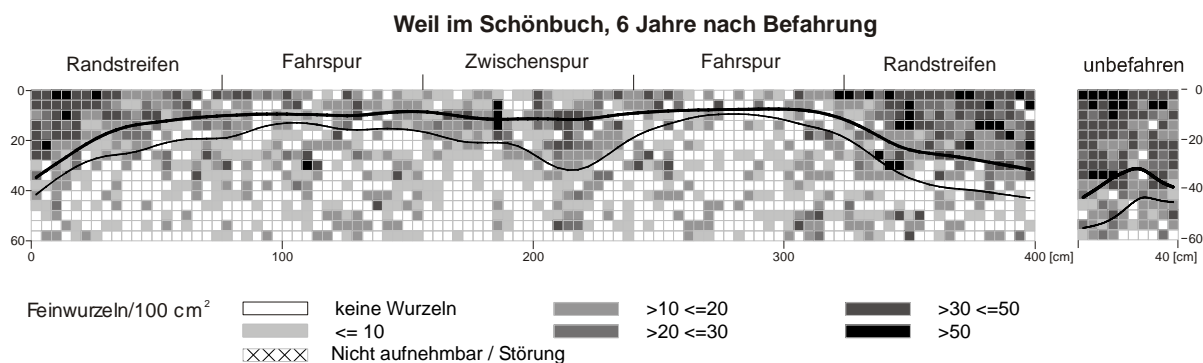


Abbildung. 3: Verteilungsmuster der Feinwurzelichten (Durchmesser < 2 mm) auf einem Fahrspurtransekt in Weil im Schönbuch (links). Rechts dargestellt ist die unbefahrene Kontrolle. Obere Linie entspricht dem Grenzwert für eine intensive Feindurchwurzelung (20 Feinwurzeln pro 100 cm²), die feinere Linie einer extensiveren Durchwurzelung (10 Feinwurzeln pro 100 cm²).

Sowohl für die Feinwurzelichte als auch für die Durchwurzelungstiefe wurden die geringsten Werte unter der Fahrspur gefunden. Selbst unmittelbar an der Bodenoberfläche wiesen in diesem Bereich zahlreiche Zählzellen keine Feinwurzeln auf. Die intensiv durchwurzelte Zone mit mehr als 20 Feinwurzeln pro 100 cm² verlief unter der gesamten Fahrtrasse nahezu oberflächenparallel in einer Tiefe von 10 bis 12 cm. Erst im Randbereich stieg die Durchwurzelungstiefe deutlich an und erreichte am Profilrand nahezu die Tiefe des Kontrollprofils. Der Bereich extensiverer Durchwurzelung (mehr als 10 Feinwurzeln pro 100 cm²) folgt im Verlauf der intensiver durchwurzelten Zone. Im Zwischenspurbereich ist eine im Vergleich zur Fahrspursituation tiefer reichende Durchwurzelung gegeben. Im Kontrollprofil findet sich über die gesamte Tiefe eine homogenere Feindurchwurzelung.

Diese Intensität und Durchwurzelungstiefe wird auch 50 bis 80 cm außerhalb des Fahrspurbereichs noch nicht erreicht.

Dieser Befund verdeutlicht, dass in Folge der Befahrung nicht nur im unmittelbar verformten Bereich reduzierte Feinwurzel-dichten auftreten. Über die gesamte Fahrtrasse und darüber hinaus ist ein negativer Befahrungseinfluss auf die Wurzelraumerschließung eingetreten. Das auf der Versuchsfläche Weil im Schönbuch vorgefundene Verteilungsmuster der Feindurchwurzelung korrespondiert mit dem Ergebnis eines zweidimensionalen Modells der Sauerstoffverteilung unter Fahrspuren, das von Schack-Kirchner et al. (1993) vorgestellt wurde. Bei diesem beschränkte sich die Zone reduzierter Sauerstoffverfügbarkeit wie beim Verteilungsmuster der Feinwurzeln nicht nur auf den unmittelbar verformten Bereich, sondern reichte weit in den nicht überfahrenen Boden hinein.

Praxisuntersuchung zur Dauerhaftigkeit von Befahrungsschäden

An gut dokumentierten Praxis-Fahrspuren, die zwischen 6 und 24 Jahren alt und seit der letzten Befahrung nachweislich nicht mehr befahren waren, wurden Untersuchungen des Belüftungsstatus und der Feinwurzel – Tiefenverteilung mit dem Ziel durchgeführt, anhand dieser unechten Zeitreihe Regenerationsansätze zu identifizieren (v. Wilpert und Schäffer, 2006). Außerdem sollten mit dieser explorativen Studie ungefähre Zeitdauer und räumliche Entwicklung natürlicher Regenerationsvorgänge auf Fahrtrassen orientierend eingeschätzt werden. Die Randbedingungen der Studie sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Rahmenbedingungen der Regenerationsstudie

	Weil im Schönbuch	Wolfegg	Ettenheim 1	Ettenheim 2	Mengen
Geologie	Löss	Glazialer Lehm	Löss		Glazialer Lehm
Bestand	Fichtenstangenholz mit Buche, Lärche	Fichtenbaumholz	Buchendickung mit Eiche, Fichte, Kiefer		Fichtenstangenholz
Alter	35 - 40	50 - 55	18	24	35
Erntemaßnahme	Durchforstung	Durchforstung	Streifenkahlschlag		Räumung nach Sturm
Erntetechnik	<i>Timberjack 1270</i> (16 t Gewicht) <i>Ponse HS 10</i> (~15 t Gewicht)	<i>FMG 746/250</i> <i>ÖSA Super Eva</i> (12.6 t Gewicht)	<i>Motormanuell</i>		<i>Motormanuell</i>
Rücketechnik	<i>Valmet Forwarder</i> (Gesamtgewicht: >15 t)	<i>FMG 678</i> <i>Mini-Bruunett</i> (Gesamtgewicht: 16 t)	<i>Welte Ökonom/Unimog U90</i> (Gesamtgewicht: 9 - 10 t)		<i>Eicher "Königstiger"</i> (Eigengewicht ca. 3 t)
Zeit seit Ernte	6 Jahre	12 Jahre	18 Jahre	24 Jahre	35 Jahre

Die Untersuchung von Tiefenprofilen des Diffusionskoeffizienten ergaben, dass unter den Fahrspuren 6 Jahre nach der Befahrung eine signifikante Verminderung der diffusiven Luftleitfähigkeit gegenüber der Kontrollfläche bis in 24 cm Bodentiefe zu beobachten war und nach 14 Jahren bis in 14 cm (Abbildung 4). In den Oberbodenschichten bis 24 cm ist der

relative Diffusionskoeffizient in den ersten 14 Jahren nach der Befahrung durchschnittlich um den Faktor 4-10 gegenüber der Kontrolle vermindert, was eine Erhöhung des Fließwiderstands für den Bodenluftaustausch in der gleichen Größenordnung bedeutet. Das heißt, dass an der Schnittstelle zwischen Boden und Atmosphäre, über die die Bodenbelüftung zwingend erfolgen muss, eine Reduktion der Gasdurchlässigkeit eingetreten ist, welche die Belüftung des gesamten darunter liegenden Bodenprofils einschränkt. Damit werden sowohl das Wurzelwachstum im gesamten Bodenprofil behindert als auch die strukturschaffende Bioturbationsleistung der Bodenfauna – der einzige effektive Prozess der Regeneration natürlicher Bodenfunktionen nach befahrungsbedingten Bodenschäden.

Ältere Fahrspuren zeigten in den obersten 14 cm Bodentiefe eine erste Erholung der belüftungsrelevanten Bodenstruktur, die jedoch auch 18 und 24 Jahre nach der Befahrung noch lange nicht die auf den Kontrollflächen gemessene Gasdurchlässigkeit voll wiederhergestellt hat, sondern nur ein Zwischenstadium, das sich nicht mehr signifikant zwischen Fahrtrassen und Kontrollfläche unterscheidet. Die Gasdiffusionskoeffizienten betragen auf den Fahrspuren immer noch ca. 50% der Kontrolle. Dies ist schon als deutlicher Hinweis auf die erhebliche Dauerhaftigkeit der durch Befahrung ausgelösten Störung ökologischer Bodenfunktionen zu werten.

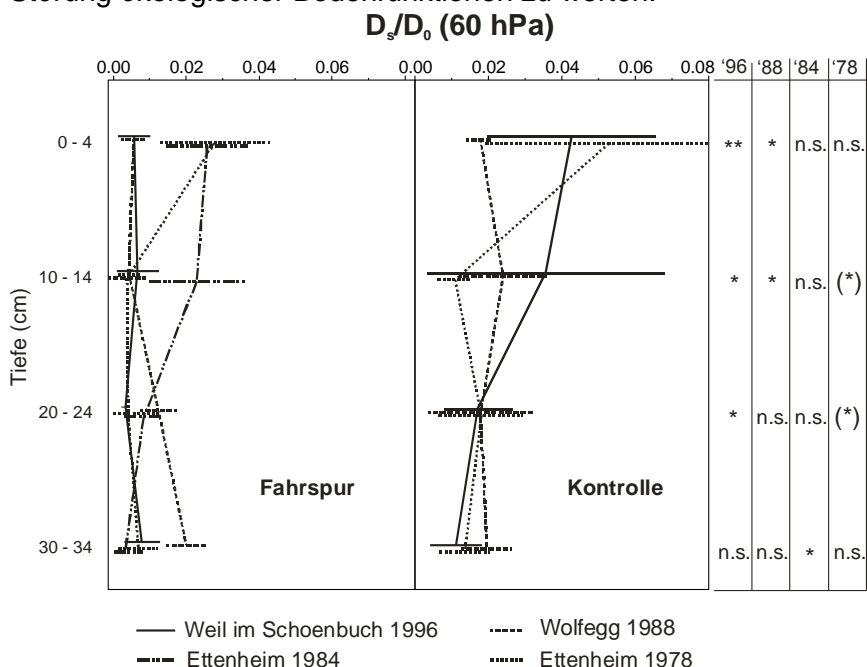


Abbildung 4: Tiefenprofile des relativen Gasdiffusionskoeffizient (D_s/D_0) bei Feldkapazität (60 hPa) an 6 – 24 Jahre alten Fahrspuren und Kontrollflächen. Signifikanzniveaus für den Unterschied zwischen Fahrspur und Kontrolle: (***) $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, (*) $p < 0.1$, n. s. = nicht signifikant. Querbalken: einfache Standardabweichung

Die unter den unterschiedlich alten Fahrspuren beobachteten Tiefenprofile der Feinwurzeldichte und deren relative Unterschiede zur Kontrolle können als direkter „Bioindikator“ der Regeneration der Wurzelraumfunktion des Boden interpretiert werden. Wenn der Luftaustausch über die Bodenoberfläche wieder den hohen Sauerstoffbedarf physiologisch aktiver und wachsender Wurzeln decken kann, steigt die Feinwurzeldichte wieder auf das natürlich, auf den unbefahrenen Kontrollflächen beobachtete Maß an (Abbildung 5). Dabei ist zu beachten, dass eine Behinderung der Bodenbelüftung im Bereich der Bodenoberfläche die Durchwurzelungsintensität im gesamten Bodenprofil vermindert.

Das heißt, dass eine Regeneration der Feinwurzeldichte noch stärker als die Regeneration von Bodenstruktur und Belüftung an der Bodenoberfläche beginnt und erst allmählich in tiefere Bodenschichten voranschreitet.

Relative Feinwurzeldichten unter Fahrspuren

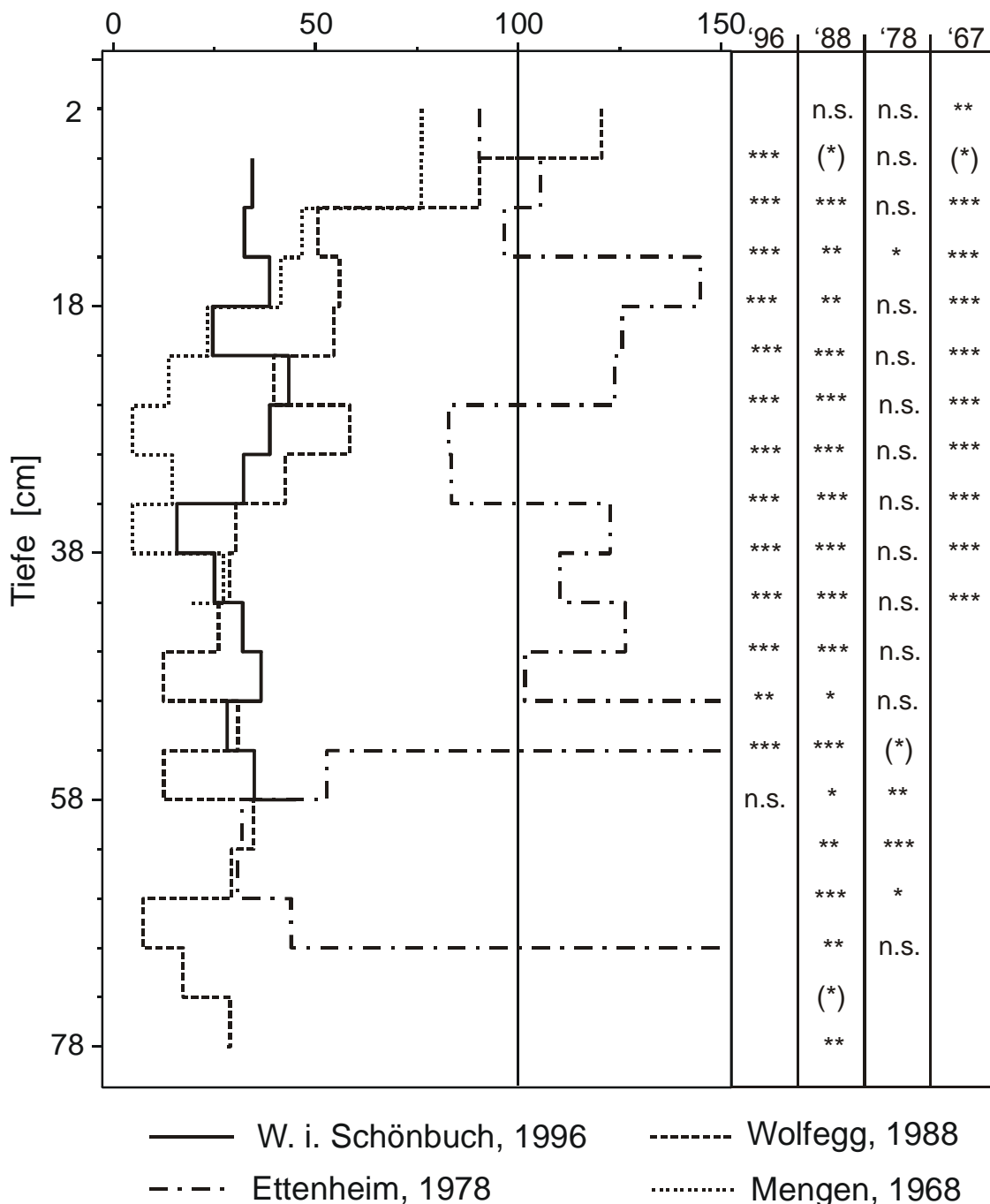


Abbildung 5: Tiefenprofile der relativen Feinwurzeldichte in Prozent der Kontrollfläche an 6 – 24 Jahre alten Fahrspuren. Vertikale Kontrolllinie (100%) = Kontrollfläche. Signifikanzniveaus im nichtparametrischen Wilcoxon Test für den Unterschied zwischen Fahrspur und Kontrolle: (***) $p < 0.001$, (**) $p < 0.01$, (*) $p < 0.05$, (·) $p < 0.1$, n. s. = nicht signifikant. Querbalken: einfache Standardabweichung

Bis 18 Jahre nach der Befahrung sind die Feinwurzeldichten durch das gesamte beobachtete Bodenprofil überwiegend auf 50% der Kontrolle oder darunter reduziert. Eine schwach ausgeprägte Regeneration der Feinwurzeldichte beginnt nach 14 Jahren von der Bodenoberfläche her und erreicht eine Tiefe von maximal 8 cm. Vier Jahre später, 18 Jahre nach der Befahrung, reicht die Erholung der Feinwurzeldichte bis in 20 cm Tiefe.

Vierundzwanzig Jahre nach der Befahrung scheint sich die Feinwurzeldichte im gesamten Bodenprofil weitgehend erholt zu haben – sie pendelt um die 100 % - Linie, entspricht also den Messwerten auf der Kontrollfläche. Allerdings sind die Flächen in Ettenheim mit den ältesten Fahrspuren insofern nicht ganz mit den anderen Flächen zu vergleichen, als die dortigen Laufholzbestände eine höhere Wurzelaktivität als die Fichtenbestände auf den jüngeren Flächen aufweisen. Außerdem waren die dort eingesetzten Forstmaschinen leichter und verursachten somit keine so tief in den Boden reichenden Verdichtungsschäden (Vossbrink und Horn, 2004), wie auf den jüngeren Flächen, auf denen schwerere Maschinen im Einsatz waren (s. Tabelle 1). Die Vermutung für die Regeneration von Befahrungsschäden günstiger Rahmenbedingungen auf der Praxisfläche Ettenheim wird von qualitativen Beobachtungen an mehreren, bis zu 30 Jahre alten Rückegassen bestätigt, die allerdings nicht in eine systematische Studie einbezogen waren wie das hier vorgestellte Material. Diese Einzelbeobachtungen zeigten auch nach 30 Jahren keine effektive Regeneration der Wurzelraumfunktion unter den Trassenflächen.

Konsequenzen für Bodenschutzstrategien in der Praxis

Es bleibt festzuhalten, dass die Regeneration von Bodenschäden durch Befahrung, insbesondere, wenn die auf den Boden wirkende Gesamtlast >10 - 15 t beträgt und die Tiefenwirkung der Bodenverformung i.d.R. den gesamten Hauptwurzelraum erfasst (Vossbrink und Horn, 2004), unter günstigen Randbedingungen ca. 25 Jahre, im Normalfall deutlich längere Zeiträume benötigt.

Da im Zuge des technischen Fortschritts ständig steigende Maschinengewichte und Auflasten (Schack-Kirchner und Hildebrand, 2009) zu signifikanten Bodenverformungen in den Unterböden (50 – 60 cm) führen, in denen sowohl biologische als auch physikalische Strukturbildungsprozesse mit geringer Rate oder gar nicht ablaufen, ist mit einer effektiven Regeneration dort nicht zu rechnen.

Es bedarf einer differenzierten Bodenschutzstrategie, um eine solch dauerhafte Schädigung der Bodenstruktur und Einschränkung essentieller Bodenfunktionen wie die Bodenbelüftung zu minimieren bzw. zu vermeiden und gleichzeitig eine maschinengestützte Holzernte zu ermöglichen (Schäffer, 2005). Mit der Richtlinie Feinerschließung (MLR, 2003) wurde eine solche praxisorientierte Bodenschutzstrategie für mechanisierte Holzerntemaßnahmen in Baden-Württemberg erlassen. Verbindliche Festlegungen in dieser Richtlinie sind:

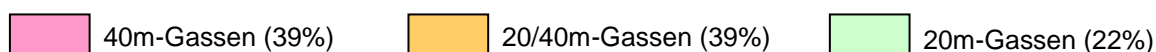
- Flächiges Befahren von Waldbeständen ist zu unterlassen
- Konzentrierung notwendiger Befahrung auf Wege, Maschinenwege und Rückegassen
- Dauerhafte Kennzeichnung und Dokumentation von Rückegassen
- Erhaltung von deren technischer Befahrbarkeit, ggf. mittels Teilbefestigung
- Möglichst vorhandene Wege und Fahrtrassen weiter nutzen, um flächige Akkumulation von Befahrungsschäden zu vermeiden
- Der Rückegassenabstand wird an die Befahrungssensitivität des Bodens angepasst. Der Regelabstand von Rückegassen ist 40 m. In dichten Jungbeständen können zeitlich begrenzt Rückegassen im 20 m - Abstand angelegt werden. Nicht mehr benötigte Rückegassen sind aufzulassen und, wenn nötig, die Regeneration von Bodenschäden durch aktive Maßnahmen wie mechanische Lockerung und Hilfspflanzenanbau zu unterstützen.

Weitergehende Bodenschutzmaßnahmen als in den meisten Befahrungsrichtlinien anderer Länder sind in Baden-Württemberg durch die Festlegung des Regelabstands zwischen Rückegassen von 40 m und durch die Bestimmung, Bodenschäden auf nicht mehr benötigten Trassen durch aktive Regenerationsmaßnahmen zu beseitigen, gegeben. Um sowohl den organisatorisch – technischen Anforderungen der mechanisierten Holzernte als

auch dem Bodenschutz gleichermaßen Rechnung zu tragen und der Gefahr von durch zu restriktiven Regeln provozierten Ausweichhandlungen vorzubeugen, wurde eine standortsdifferenzierte Festlegung von Rückegassenabständen in Abhängigkeit von der Befahrungsempfindlichkeit der Substrate getroffen (Tab. 2). Dabei wurden sowohl Aspekte wie die mechanische Stabilität der Böden durch Steinigkeit berücksichtigt als auch die überproportional hohe physikalische Regenerationsrate auf Tonböden durch Quellen und Schwinden. Auf letzteren müssen jedoch i.d.R. aufgrund der extrem hohen Sensitivität gegenüber einer Störung der technischen Befahrbarkeit Alternativen zur Befahrung auf Rückelinien, z.B. Horizontal-Seillinienverfahren in Betracht gezogen werden.

Tabelle 2: Befahrungsempfindlichkeit der Waldböden in Baden-Württemberg und Rückegassenabstände nach der Richtlinie Feinerschließung (MLR 2003)

Bodenarten-/Substratgruppe	Flächenanteil	Befahrungsempfindlichkeit		Hangneigung	
		bodenökologisch	technisch	Ebene, Hänge geringerer Neigung	Steilhänge/ Sonderstandorte
Tone, Zähtone, Mergeltone	2%	-	+	98 %	2%
Kalkverwitterungslehme, Mergelböden	7%	-	-/+	89%	11%
Tonlehme	3%	+	+	100%	-
Schlufflehme	24%	+	+	94%	6%
schluffige, sandige, sandig-tonige, grusige und steinige Lehme	12%	+	+	88%	12%
schwach lehmige bis lehmige Sande und Feinsande, lehmige Grusböden und Grushänge, Kies- und Schotterlehme	34%	-/+	-/+	74%	26%
Lehmfreie bis schwach lehmige Sand-, Grus-, Kies- und Steinschuttböden	10%	-	-	36%	64%
Blockhänge, Blocklagen und Felshänge	3%	-	-	34%	66%
Substrate mit großer bodenartlicher Bandbreite	4%	-/+	-/+	41%	59%
Standorte mit mehr als 20 cm organischer Auflage, v.a. Moore und Missen	1%	-/+	-/+	82%	18%



In Tabelle 2 ist auf den Lehmen, den leistungsfähigsten Standorten, welche die höchste Befahrungsempfindlichkeit aufweisen, bindend die Einhaltung eines Rückegassenabstands von 40 m vorgeschrieben. Dies betrifft in Baden-Württemberg einen Flächenanteil von knapp 40 %. Auf Böden mit geringerer Neigung zu dauerhaften, ökologischen Befahrungsschäden - hier sind stärker steinige und tonige Böden zusammengefasst (letztere wegen ihres physikalischen Regenerationsvermögens) - wird ein Rückegassenabstand von 20 m zugelassen. Dies trifft auf etwas mehr als 20 % der Fläche zu. Auf tonigen Böden ist diese Festlegung außer durch ihr Regenerationsvermögen durch die Tatsache begründet, dass auf diesen gegenüber einer Zerstörung der technischen Befahrbarkeit außerordentlich empfindlichen Substraten durch den 20 m Rückegassenabstand die Befahrungsintensität und damit die Gefahr von Gleisbildung vermindert wird. Auf sandigeren, steinigere Lehmen wird eine zeitlich begrenzte Nutzung von Trassen im 20 m Abstand für die Erst- und ggf. Zweituderforstung in Jungbeständen zugelassen. Dieser Ausnahmetatbestand ist durch den in dichten Jungbeständen begrenzten Aktionsradius mechanisierter Holzernteverfahren begründet. Da in dieser Bestandesphase geringere Holzmassen anfallen, können zudem

leichtere Maschinen eingesetzt werden. Die Richtlinie schreibt vor, nach der Jungbestandsphase jede zweite Rückegasse aufzulassen und, wenn nötig, aktiv zu rekultivieren. In älteren Beständen wird aufgrund des längeren Holzes und der höheren Maschinenreichweiten ein Gassenabstand von 20 m nicht mehr benötigt.

Es ist damit zu rechnen, dass im Zuge der Umsetzung eines solchen Organisationskonzepts ein Bedarf für die aktive Unterstützung der Regeneration von Befahrungsschäden auf aufgelassenen Fahrtrassen bestehen wird. Da über die technischen Vorgehensweisen einer solchen aktiven Förderung und deren Effizienz wenig bekannt ist, werden derzeit von diversen Arbeitsgruppen Versuche angelegt und betrieben, welche die Entwicklung praxistauglicher Konzepte zur aktiven Regeneration von Befahrungsschäden zum Ziel haben. Dabei werden Hilfspflanzenanbauten (z.B. Lüscher und Sciacca, 2009), mechanische Bodenlockerung in Kombination mit Hilfspflanzenanbau und Kalkung (Kremer, 2008) getestet. Ein interessanter Ansatz ist der Einsatz von Gräsern und krautigen Pflanzen, deren Wurzeln über ein Aerenchym verfügen und so in teilanaerobe und anaerobe Bodenpartien einwachsen und diese lockern können (Gaertig und Green, 2009). Die Flatterbinse (*Juncus effusus*) verfügt über ein solches Regenerationspotential, wie Klimo (1983) anhand von Messungen der Lagerungsdichte nachweisen konnte.

Die hier vorgestellten Organisationskonzepte zur praktischen Realisierung von Bodenschutz während der mechanisierten Holzernte sollen in das strategische Konzept zum Nachhaltigkeitsmanagement des Landesbetriebs ForstBW als integraler Bestandteil aufgenommen werden. Durch diese politische Verankerung soll die Umsetzung von Bodenschutzstrategien während der Holzernte verbessert und durch Dokumentation diese Vorsorgeleistung sichtbar gemacht und bewertet werden.

Literatur

- Frede, H.G. (1986): Der Gashaushalt von Waldböden. Göttinger Bodenkundliche Berichte, Bd. 87, 130 S.
- Gaertig, T., Green, K. (2009): Die Waldbodenvegetation als Weiser für Bodenstrukturstörungen. In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 83-105.
- Gaertig, T. (2001): Bodengashaushalt, Feinwurzeln und Vitalität von Eichen. Freiburger Bodenkundliche Abhandlungen, H. 40, 157 S.
- Gaertig, T., H. Schack-Kirchner und E.E. Hildebrand (2001): Steuert Gasdurchlässigkeit im Boden Feinstwurzeldichte und Vitalität bei Eiche. AFZ/Der Wald 25, 1344-1347.
- Gaertig, T., K. v. Wilpert und H. Schack-Kirchner (1999): Bodenbelüftung als Steuergröße für das Feinwurzelnwachstum. Allg. Forst- u. Jagdztg. 170, 81-87.
- Hildebrand, E.E. (1994): Forest Soils - Medium for Root Growth. In: Proceedings from ECE-FAO-ILO Interactive Workshop and Seminar FORSITRISK Soil, Tree, Machine Interactions 4.-8.7.94 in Feldafing, Germany.
- Hildebrand, E.E. (1987): Die Struktur von Waldböden – ein gefährdetes Fließgleichgewicht. Allg. Forst Zeitschr. 42, 424 –426.
- Hildebrand, E.E. (1986): Der Einfluss der Strukturschädigung von Feinlehmen auf die Wurzelentwicklung zweier Fichtenklone. Mitt. Verein Forstl. Standortskunde u. Forstpflanzenzüchtung 32, 50-56.
- Klimo, E. (1983): The influence of clear cut logging on soil properties and the cycle of elements in the ecosystem of spruce forest. Lesnictvi, 29, 427-512.
- Kremer, J. (2008): Regenerationsvermögen befahrungsbedingt strukturveränderter Böden. LWF aktuell, 67, 13-15.
- Lüscher, P., Sciacca, S. (2009): Bodenbeeinträchtigungen im Wald: Probleme und Lösungsansätze in der Schweiz. In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 11-18.
- MLR (Ministerium für Ländlichen Raum Baden-Württemberg) (2003): Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Feinerschließung von Waldbeständen. 27 S.

Murach, D., L. Isle, F. Klaproth, A. Parth und H. Wiedemann (1993): Rhizotron-Experimente zur Wurzelverteilung der Fichte. Forstarchiv 64, 191-194.

Qi, J., J.D. Marshall, K.H. Mattson (1994): High soil carbon dioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas fir. New Phytol. 128, 435-442.

Schack-Kirchner, H., E.E. Hildebrand und K. v. Wilpert (1993): Bodensauerstoffgehalt unter Fahrspuren, Einsatz eines Simulationsmodells. Allg. Forst Zeitsch. 3, 118-121.

Schack-Kirchner, H., Hildebrand, E. E. (2009): Wie lässt sich das „Verformungsexperiment“ in unseren Waldböden stoppen? In: Walderschließung und Bodenschutz, Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Freiburger Forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 1-9.

Schäffer, J. (2005): Befahrung von Waldböden – Strategien zur Schadensminimierung. Bodenschutz, 03, 76-82.

Vossbrink, J.; Horn, R. (2004): Modern forestry vehicles and their impact on soil physical properties. Eur. J. Forest Res., 123, 259-267.

v. Wilpert, K. Schäffer, J.: (2006): Ecological effects of soil compaction and initial recovery dynamics: a preliminary study. European Journal of Forest Research, 125/2, 129-138.

Zur Person:

LtdFDiR

PD Dr. Klaus v. Wilpert

Forstl. Vers. u. Forschungsanst. Baden-Württemberg (FVA)

Abteilungsleiter

Abteilung Boden und Umwelt (BU)

Während meiner Forschungsarbeit an der Forstlichen Versuchs u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg war ich mit Schwerpunkt mit Aufbau, Betrieb und Auswertung der Messnetze der Forstlichen Umweltüberwachung im Wald befasst. Schwerpunktbereiche sind die Bodenzustandserfassung im Wald (BZE), die Ernährungsinventur im Wald, das Depositionsmessnetz und das Stoffflussmessnetz (Level II).

In den letzten 5-10 Jahren wurden unter meiner Leitung statistisch basierte Regionalisierungsmodelle entwickelt, die bodenchemische und –physikalische Zustandsgrößen ausgehend von den in systematischen Gitternetzen vorliegenden Daten der Umweltmessnetze in Bereichen schätzen, in denen keine Messungen vorliegen. Diese quasi-kontinuierlichen Geländemodelle sind eine wertvolle Planungsgrundlagen.

OFR

Dr. Jürgen Schäffer

Forstl. Vers. u. Forschungsanst. Baden-Württemberg (FVA)

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Abteilung Boden und Umwelt (BU)

Schwerpunkt meiner Forschungstätigkeit an der FVA lag im Bereich der Bodenphysik Untersuchung von Bodenstruktur- und Belüftungsstörungen befahrener Waldböden und Wurzelraum im Vordergrund. Daneben befasste ich mich mit der Wirkung von Waldböden Senke klimarelevanter Spurengase.

Zu meinen Aufgaben zählt weiterhin die Betreuung von Düngeversuchsflächen und Monitoringmessnetzen und deren Auswertung sowie die Entwicklung und Umsetzung von Konzepten zur Bodenschutzkalkung.

