

SCHRIFTENREIHE
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

BAND 53

Jürgen Schäffer

**Bodenstruktur, Belüftung und Durchwurzelung
befahrener Waldböden –
Prozessstudien und Monitoring**

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT
BADEN-WÜRTTEMBERG

ABTEILUNG BODEN UND UMWELT

2012

Bibliographische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dbb.de> abrufbar.

ISSN 1436-0586

ISBN 978-3-933548-54-2

Die Herausgeber

Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg und
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Redaktionskomitee

Prof. Dr. J. Huss

PD Dr. K. v. Wilpert

Prof. Dr. W. Konold

Dr. Gerald Kändler

Umschlaggestaltung

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

Druck

Eigenverlag der FVA, Freiburg

Bestellung an

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Wonnhaldestraße 4

79100 Freiburg

Telefon: 0761/4018-0, Fax: 0761/4018-333

e-Mail: fva-bw@forst.bwl.de

Alle Rechte, insbesondere das Recht zur Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung vorbehalten.

Gedruckt auf 100% chlorfrei gebleichtem Papier.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG UND ÜBERBLICK	1
1.1	RAHMENBEDINGUNGEN UND KONTEXT DER ARBEIT	1
1.2	ARBEITSHYPOTHESEN UND ZIELE	5
1.3	ÜBERBLICK ÜBER DIE ARBEIT	7
2	IN SITU ERFASSUNG DES WURZELWACHSTUMS MIT RHIZOTRONSCHEIBEN – EINE PILOTSTUDIE	11
2.1	EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG	11
2.2	MATERIAL UND METHODEN	13
2.2.1	Untersuchungsfläche	13
2.2.2	Aufbau der Rhizotronscheibe und Wurzelaufnahme	14
2.2.3	Bodenbelüftung	15
2.2.4	Bodentemperatur, Niederschlag und Bodenfeuchte	17
2.2.5	Schrumpfungsrissbildung	17
2.2.6	Statistische Auswertung	18
2.3	ERGEBNISSE	19
2.3.1	Bestandesniederschlag, Bodentemperatur und Wassergehalt	19
2.3.2	Bodenlufthaushalt	21
2.3.3	Wurzelraumschließung hinter der Rhizotronscheibe	23
2.3.4	Schrumpfungsrissbildungen in den Fahrspuren	26
2.4	DISKUSSION	28
2.4.1	Belüftungsverhältnisse im unbefahrenen Bestand und in der Fahrspur	28
2.4.2	Belüftungssituation hinter der Rhizotronscheibe	29
2.4.3	Durchwurzelung hinter der Rhizotronscheibe	29
2.4.4	Bewertung der Rhizotronmethode	31
2.4.5	Schrumpfungsrisse – Ansatzpunkte für die Strukturregeneration?	32
2.5	ZUSAMMENFASSUNG	33
2.6	SUMMARY	34

3 ANALYSIS OF FINE ROOTING BELOW SKID TRAILS USING LINEAR AND GENERALIZED ADDITIVE MODELS	37
3.1 ABSTRACT	37
3.2 INTRODUCTION	37
3.3 METHODS	39
3.3.1 Investigation site	39
3.3.2 Rooting data	40
3.3.3 Statistical analysis	41
3.4 RESULTS AND DISCUSSION	44
3.4.1 Linear model	45
3.4.2 Generalized linear model	48
3.4.3 Generalized additive model	49
3.5 CONCLUSION	57
4 RECOVERY OF SOIL STRUCTURE AND FINE ROOT PROPAGATION IN COMPACTED FOREST SOILS	59
4.1 ABSTRACT	59
4.2 INTRODUCTION	59
4.3 METHODS	61
4.3.1 Investigation sites	61
4.3.2 Root counting and soil physical analysis	65
4.3.3 Modeling of root densities	66
4.3.4 Software Details	70
4.4 RESULTS	70
4.4.1 Macropore volume	70
4.4.2 Diffusive permeability	72
4.4.3 Recovery of fine rooting	76
4.5 DISCUSSION	79
4.6 CONCLUSIONS	82

5	DEFORMATION DAMAGES IN FOREST TOPSOILS - AN ASSESSMENT BASED ON LEVEL-I SOIL MONITORING DATA FROM BADEN- WÜRTTEMBERG (SW GERMANY)	85
5.1	ABSTRACT	85
5.2	INTRODUCTION	86
5.3	MATERIAL AND METHODS	87
5.3.1	Soil-monitoring network	87
5.3.2	Experimental design	87
5.3.3	Analysis of hydromorphic properties and topsoil structure	89
5.3.4	Statistical analysis	91
5.4	RESULTS	92
5.4.1	Primary and secondary topsoil structure type	93
5.4.2	Rust agglomerations	95
5.4.3	Structural composition	95
5.4.4	Degree of deformation damage	96
5.5	DISCUSSION	99
5.5.1	Natural causes for soil-structure deficits	99
5.5.2	Validity of the identification key	100
5.5.3	Relevance of deformation damages	100
5.6	CONCLUSION	101
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	103
7	CONCLUSIONS AND OUTLOOK	113
8	ZUSAMMENFASSUNG	121
9	SUMMARY	125
	LITERATURVERZEICHNIS	129
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	139
	TABELLENVERZEICHNIS	145
	DANKSAGUNG	147

8 ZUSAMMENFASSUNG

Natürlich gelagerte Waldböden sind in der Lage, die teilweise konkurrierenden Ansprüche der Bäume an Wasser-, Nährstoff- und Sauerstoffversorgung zu gewährleisten. Diese Funktionserfüllung setzt jedoch eine intakte Bodenstruktur voraus. Eine schadensfreie Befahrung von Waldböden ist in der Regel nicht möglich, da bereits geringe Krafteinwirkungen ausreichen, die Eigenstabilität der Waldböden zu überschreiten. Aufgrund der langen Persistenz der Verformungsschäden und der unzureichenden Umsetzung eines Schadensvermeidungskonzeptes, trat in den befahrbaren Lagen eine Akkumulation von Befahrungsschäden ein. Als sensitive Kenngröße für die Beurteilung des durch Verformung eingetretenen Bodenschadens hat sich die Bodenbelüftung herauskristallisiert, welche eng mit der Wurzelraumschließung verknüpft ist: Da der gesamte Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre über die Bodenoberfläche erfolgen muss, wirkt sich eine befahrungsbedingte Einschränkung des Gastransports im gesamten Bodenprofil aus. Je größer der verformte Bereich ist, desto länger werden die Transportwege, auf denen Sauerstoff verbraucht wird. Die Gefahr einer Sauerstoffunterversorgung der Wurzeln steigt daher vom Rand zur Mitte der Fahrspur.

Ziel dieser Arbeit war es, dem Zusammenhang zwischen Bodenstruktur, Bodenbelüftung und Durchwurzelung sowohl in einem prozessorientierten Ansatz wie auch durch die Auswertung von Ergebnissen aus Monitoringstudien nachzugehen. Die steuernde Wirkung der Bodenbelüftung auf das Wurzelwachstum wurde mittels einer speziellen Rhizotronscheibe untersucht, die im Gelände in einer belüftungsgestörten Fahrspursituation sowie in einer ungestörten Referenzsituation eingebaut war. Dabei stand die Frage im Vordergrund, ob sich ein standortstypischer Tiefengradient hinter der Rhizotronscheibe aufrecht erhalten lässt und wie sich die unterschiedlichen Belüftungsszenarien auf das Wurzelwachstum auswirken. Anhand eines Vergleichs unterschiedlicher statistischer Modelle sollte geprüft werden, ob sich der Informationsgehalt und damit die Interpretierbarkeit von Wurzeldichteverteilungen durch Anwendung von flexiblen statistischen Verfahren, wie z.B. von Gemischten Additiven Modellen (GAMs), verbessern lassen. Hierdurch wäre eine effizientere kausale Interpretation von Wurzeldichteverteilungen unter Fahrspuren möglich. Die natürliche Restrukturierung von verformten Böden wurde anhand von Bodenbelüftung und Durchwurzelung auf 11 Praxisbefahrungsflächen abgeleitet. Dabei war von besonderem Interesse, auch möglichst lange zurückliegend befahrene Flächen, die bereits mit Forstspezialmaschinen höherer Gewichtsklasse befahren wurden, zu erfassen. Ziel der Einbeziehung der Verformungsschadensansprache in das Aufnahmeverfahren der Bodenzustandserfassung (BZE) war es, die Anwendbarkeit eines auf einfach anzusprechenden Bodenstruktur- und Hydromorphiemarkmalen beruhenden Bestimmungsschlüssels zu prüfen. Weiterhin sollte die Intensität und räumliche Verteilung von Verformungsschäden in den Waldböden Baden-Württembergs festgestellt werden.

Der Einfluss der Bodenbelüftung auf das Wurzelwachstum wurde mit speziellen Rhizotronscheiben in einem Eichenaltbestand der Vorbergzone des Schwarzwaldes

untersucht. Die Untersuchung war als Paarvergleich in einer unbefahrenen Bestandessituation sowie in einer extrem verformten Fahrspur angelegt. Nach einer zeitlich begrenzten Phase der Wurzelproliferation, die durch eine Adventivwurzelbildung nach der Installation der Scheibe beobachtet wurde, war eine weitgehend ungestörte Beobachtung des Wurzelzuwachses möglich. Auf Standorten, die zur Schrumpfungsrissbildung neigen, sind die Einsatzmöglichkeiten eingeschränkt. So trat in der Fahrspursituation an der Rhizotronscheibe im Sommer 2009 eine intensive Schrumpfungsrissbildung ein, die eine Einbeziehung des gesamten Luftraumes hinter der Rhizotronscheibe in das Makroporensystem der Schwundrisse zur Folge hatte. Durch die Veränderung der Belüftungsverhältnisse war ein intensives Wurzellängenwachstum eingetreten, welches als Anpassungsstrategie zur Überbrückung belüftungsgehemmter Bereiche interpretiert werden kann. Der im zweiten Beobachtungsjahr verstärkte Wurzelzuwachs in der Fahrspur wurde nicht mehr durch die Belüftungsverhältnisse in der verformten, kohärenten Bodenmatrix gesteuert, sondern charakterisierte vielmehr die Makroporenverhältnisse in den entstandenen Schwundrissen. Die Wurzelraumschließung, ausgehend von den Schrumpfungsrissen, kann als biogene Weiterführung der physikalischen Strukturgeneration gedeutet werden, wobei der von Schrumpfungsrissen eingenommene Flächenanteil keine rasche Regeneration der Verformungsschäden erwarten lässt.

Für die statistische Auswertung von Wurzelzählenden werden bisher überwiegend starre, parametrische Modelle eingesetzt. Da die Grundanforderungen für die Anwendung klassischer Linearer Modelle (LMs) nicht erfüllt sind (wie z.B. die Normalverteilung und die Unabhängigkeit der Beobachtungen), scheidet dieser Modelltyp für die Auswertung von Wurzelzählenden aus. Generalisierte Lineare Modelle (GLM) ermöglichen zwar die Berücksichtigung von Verteilungsannahmen und auch von räumlicher Autokorrelation; wie die einfachen linearen Modelle sind sie jedoch nicht in der Lage, ein realitätsnahes Abbild der Wurzelverteilung zu modellieren. Hierfür eignen sich GAMs, mit denen kontinuierliche Wurzeloberflächen modelliert werden können. Die hohe Flexibilität dieser Modelle liegt in der Schätzung von Spline-Funktionen begründet. Bei der Modellierung der Wurzeloberflächen unter einer sechs Jahre zurückliegend befahrenen Fahrspur wurde die höchste Anpassungsgüte mit einem Modell erreicht, in dem nur die Koordinaten der Zählzelle als Prädiktor verwendet wurden. Durch die Einbeziehung der Zugehörigkeit zu einem Fahrspurstratum (die Straten Fahrspur, Zwischenspur bzw. Außenspur wurden im Gelände anhand der Spureintiefung abgegrenzt) wurde die Modellgüte nicht verbessert. Die modellierte Wurzeloberfläche zeigte eine hohe Übereinstimmung mit modellierten Werten der Sauerstoffverfügbarkeit unter einer Fahrspur. Die Wurzelraumschließung war wie die modellierte Belüftungssituation über den begrenzten Verformungsbereich hinaus auf der gesamten Fahrtrasse beeinträchtigt.

Auf lange zurückliegend befahrenen Fahrtrassen ist die Abgrenzung von Fahrspurstraten im Gelände mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Eine stratenbezogene Auswertung mit linearen Modellen setzt eine korrekte Erfassung der Strateninformation voraus. GAMs bieten dagegen die Möglichkeit einer objektivierten Post-Stratifikation, die zu einer Validierung der Geländeansprache bzw. zu einer Neuordnung der Stratenzugehörigkeit genutzt werden kann. Diese methodische Vorgehensweise wurde für die Auswertung der Wurzeloberflächen von 11 Versuchsflächen, bei welchen die Befahrung 6 bis 37 Jahre

zurücklag, genutzt. Neben der Wurzelraumerschließung wurden belüftungsrelevante bodenphysikalische Parameter für die Beurteilung des Regenerationserfolgs herangezogen. In den obersten 10 cm bis 25 cm des Mineralbodens konnte eine Regeneration der Bodenstruktur, verbunden mit einer Angleichung der Feinwurzeldichten an die Kontrollvarianten, auf den lange zurückliegend befahrenen Fahrspuren festgestellt werden. Diese Restrukturierung im Oberboden lässt sich mit einer Akkumulation von organischem und mineralischem Bodenmaterial in der ehemaligen Fahrspur erklären, die eine höhere biologische Aktivität ermöglicht. In größerer Bodentiefe war die Persistenz der Strukturstörung und Wurzeldichtedepression – mit Ausnahme einer Versuchsfläche – hoch. Für die Aufhebung der Belüftungshemmung und der eingeschränkten Wurzelraumerschließung reichten auf verformungssensiblen Substraten unter mitteleuropäischen Verhältnissen nahezu 40 Jahre nicht aus.

Aufgrund der beobachteten Verformungsschäden abseits regulärer Feinerschließungslinien lassen darauf schließen, dass Bodenschäden durch Befahrung ein weit verbreitetes und daher ernst zu nehmendes Bodenschutzproblem darstellen. Eine systematische Erstaufnahme von Befahrungsschäden wurde im Rahmen der Außenaufnahmen der Bodenzustandserfassung in den Jahren 2006 bis 2008 an 302 Messnetzpunkten in Baden-Württemberg durchgeführt. Der dabei angewandte Bestimmungsschlüssel beruht auf Bodengefüge- und Hydromorphiemerkmalen und wurde anhand der vorkommenden Merkmalsausprägungen validiert. Das regionale Verteilungsmuster und die Intensität der erfassten Schäden deckten sich mit Praxisbeobachtungen des Vorkommens befahrungssensitiver Substrate. In den maschinenbefahrbaren Lagen wurden moderate bis extreme Verformungsschäden abseits regulär genutzter Feinerschließungslinien auf 17% der Fläche dokumentiert. Unter Berücksichtigung der gering verformten Flächenanteile (28%) sowie der auf regulären Feinerschließungslinien entfallenden Anteile (6%) summieren sich Bodenverformungen auf über 50% der befahrbaren Waldfläche Baden-Württembergs.

9 SUMMARY

Naturally structured forest soils are able to guarantee the competitive demands of tree roots on water, nutrient and oxygen supply. This functionality requires an intact soil structure. The use of heavy forest machines is not possible generally without causing damage because the internal stability of soils is easily exceeded by the external forces. Due to long-lasting, damage causing effects, and an insufficient implementation of soil protection strategies, an accumulation of wheeling damages resulted in machine passable terrain. The soil aeration status, which is closely linked to the root propagation, was found to be a sensitive parameter for the assessment of soil damage, because the whole gas exchange between atmosphere and soil has to pass the “bottle neck” at the soil surface. Therefore, the impedance of diffusion properties at the soil surface decreases the gas exchange in the whole soil profile. With the extension of the deformed area, the transport pathways for oxygen get longer. As a result, the risk of a lack of oxygen supply to the roots increases from the edges to the centre of the deformed area.

The aim of this study was to investigate the connection between soil structure, soil aeration and root propagation based on a process-orientated study and the evaluation of monitoring study sites.

The interaction between soil aeration and root propagation was investigated with a specific rhizotron technique, which was used in an undisturbed reference and a wheel track situation. The leading questions of this approach were: Is it possible to maintain a site-specific soil aeration status behind the rhizotron windows? And how does root growth react on different aeration properties? In a comparison of different statistical models, it was examined whether the use of flexible models, like Generalized Additive Models (GAMs), extended the informational content and interpretability of root density patterns. If so, more efficient causal interpretations of the impact of soil aeration on root growth would be possible. For the derivation of the natural restructuring in deformed soils, the restoration of soil aeration properties and root propagation was analysed at 11 investigation sites. The integration of several sites, where the impact of heavyweight forest machines took place long ago, was of special interest.

By recording soil structural and hydromorphical properties, the applicability of a determination key for the derivation of the degree of deformation damage should be proven, and in Baden-Württemberg, information on intensity and spatial distribution of damages in forest soils should be gathered.

The influence of soil aeration on root growth was investigated in an old growth stand dominated by oak trees at the foothills of the Black Forest. For the observation, a special rhizotron window technique was used, which, it was assumed, guaranteed a site specific aeration status behind the window. Investigations were performed in a pairwise comparison of an undisturbed reference situation and an extremely deformed wheel track situation. After a limited period of root propagation caused by adventitious root shots behind the cutting locations, an undisturbed observation of root growth behind the rhizotron window was possible. At investigation sites with a tendency towards a formation of shrinking

cracks, the use of rhizotron windows was critical. At the wheel track situation, shrinking cracks appeared in the summer of 2009, and the pore space behind the window became part of the “super macro-pore” system of these cracks. The changing aeration properties behind the rhizotron window induced an intense longitudinal growth of roots, which could be interpreted as an ecological adaptation in order to bypass areas with unfavourable oxygen supply. In the second year of observation, higher amounts of newly appearing roots at the wheel track situation reflected the aeration properties of the shrinking cracks and not those of the compacted, coherent soil matrix. The proceeding of root propagation into the soil matrix close to the shrinking cracks indicated a biological stabilisation and extension of the initial physical structures. A rapid natural regeneration of soil compaction could not be expected because the aerial extent of shrinking cracks was rather low.

Parametric models, most often inflexible, are used for statistical analyses of root count data. For this type of data, the general assumptions for the classical Linear Models (LMs), like normal distribution of the sample data or spatial independency, are not fulfilled. Generalized Linear Models (GLMs) allow for an integration of distributional assumptions and are able to cope with spatial autocorrelation. Nevertheless, these models cannot generate realistic root density surfaces. This is the domain of GAMs. Their flexibility originates from the estimation of spline functions rather than estimating rigid parameters. Using GAMs for the modeling of root count data at an investigation site where the impact took place six years ago, the best model fit was achieved with a model that used solely the coordinates of the grid cell as predictor. By integrating the skid trail strata information (the strata wheel track, medium strip and margin zone were delineated in the field according to the visual wheel track depression), no improvement of goodness of fit was achieved. The estimated root density surface revealed a high accordance with modeled distributions of oxygen concentrations below wheel tracks. The depression of root propagation was obvious throughout the whole skid trail and was not limited to directly deformed wheel track location.

If the time delay between machine passage and investigation exceeds decades, the stratification in the field becomes difficult or even impossible. Statistical comparisons based on LMs need a high accuracy of the strata information, whereas GAMs allow for post-stratification strata location. This information can be used for a verification of the field classification or even for a reallocation of the strata locations. Such a methodological approach was used for the analysis of root count data of 11 investigation sites, where the time delay of machine impact was from 6 to 37 years. Besides the root count data, soil physical data closely linked to the soil aeration status was used for judging the status of restructuring. A restoration of soil structure and root propagation was found in the uppermost 10 cm to 25 cm of the wheel track situations at the older sites. This can be explained by a filling of wheel ruts with organic and mineral material, which allowed for a higher biotic activity. In contrast to this, a high persistence of structure damage and reduced root densities were found in the deeper mineral soil. Only one study site did not fit into this pattern. Thus, we can state, that almost 40 years of natural regeneration were insufficient for an overall restoration of soil aeration properties and root propagation.

It was assumed from numerous observations of irregular soil damage that soil compaction induced by forest machines was widespread and thus a serious problem concerning soil

protection. From 2006 to 2008, a first systematic overview of soil deformation in forest soils was gathered during the field campaign at 302 grid points of the national soil survey in Baden-Württemberg. For this purpose, a determination based on easily detectable soil structure and hydromorphical properties was used. This key was verified by plausibility checks performed on the data. Intensity of damages and spatial pattern were in accordance with observations in practice on compaction sensitive substrates in Baden-Württemberg. In machine passable terrain, moderate up to extreme deformation damages were found at 17% of the investigated grid points. Summing up this percentage with the damages found at the regularly used skid trails (6%) and the points with low damages (28%), more than 50% of the forested area passable by forest machines showed indications of deformation damages.