

SCHRIFTENREIHE  
FREIBURGER FORSTLICHE FORSCHUNG

BAND 44

Sonja Amann

**Bodenbelüftung und Bodenstruktur unter Fichte:  
Bandbreite und Ursachen der Heterogenität**

FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT  
BADEN-WÜRTTEMBERG

ABTEILUNG BODEN UND UMWELT

2010

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek:**

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

ISSN 1436-0586

ISBN 978-3-933548-45-0

**Die Herausgeber:**

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

**Redaktionskomitee:**

Prof. Dr. J. Huss

Dr. G. Kändler

Prof. Dr. W. Konold

PD Dr. K. v. Wilpert

**Umschlaggestaltung:**

Bernhard Kunkler Design, Freiburg

**Druck:**

Eigenverlag der FVA, Freiburg

**Bestellung an:**

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt

Baden-Württemberg

Wonnhaldestraße 4

79100 Freiburg

Tel.: (07 61) 40 18-0 Fax: (07 61) 40 18-3 33

E-Mail: [fva-bw@forst.bwl.de](mailto:fva-bw@forst.bwl.de)

Internet: [www.fva-bw.de](http://www.fva-bw.de)

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

Gedruckt auf 100% chlorfrei gebleichtem Papier

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Rahmenbedingungen und Kontext der Arbeit	1
1.2	Fragestellungen und Ziele der Arbeit – Arbeitshypothese	2
<b>2</b>	<b>BODENSTRUKTUR UND BODENBELÜFTUNG</b>	<b>5</b>
2.1	Verflechtung von Bodenstruktur und Bodenbelüftung	5
2.2	Gastransport im Boden	5
2.3	CO <sub>2</sub> in der Bodenluft	6
2.4	Auswirkungen eingeschränkter Bodenbelüftung	7
2.5	Einflussfaktoren auf Bodenstruktur und Bodenbelüftung	7
2.5.1	Befahrung	7
2.5.2	Natürliche Einflussfaktoren	8
<b>3</b>	<b>WINDINDUZIERTER WURZELBEWEGUNG</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>STANDORTE</b>	<b>13</b>
4.1	Kriterien der Versuchsflächenauswahl	13
4.2	Regionale Einordnung	13
4.3	Versuchsflächen	15
<b>5</b>	<b>METHODEN</b>	<b>21</b>
5.1	Räumliche Hierarchien im Geländeversuch	21
5.1.1	Flächige Untersuchungen	21
5.1.2	Untersuchungen an voneinander abgrenzbaren Kleinstandorten	21
5.1.3	Einzelbaumbezogene Untersuchungen	23
5.1.4	Weitere Untersuchungen	23
5.2	Bodengasgewinnung und Analytik	23
5.2.1	Sondenmethode	23
5.2.2	Bodengaslysimeter	26
5.3	Scheinbarer und relativer scheinbarer Diffusionskoeffizient	27
5.4	Gelände-Kammermessungen	30
5.5	Modellierung von Gasflüssen und CO <sub>2</sub> -Produktion	32
5.6	Hochaufgelöste Bestimmung der Lagerungsdichte	37

5.7	Bestimmung der Feinwurzelverteilung	37
5.8	Windinduzierte Wurzelbewegung	37
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE</b>	<b>39</b>
6.1	Flächige Aufnahmen	39
6.1.1	Heiligkreuztal	39
6.1.2	Steinhausen	45
6.1.3	Vergleich der Versuchsflächen	50
6.2	Untersuchungen der voneinander abgegrenzten Kleinstandorte „Wurzelbereich lebender Fichten“, „Bereich alter Wurzelstöcke“ und „Zwischenstammbereich“	51
6.2.1	Tiefenprofile der CO <sub>2</sub> -Konzentration	51
6.2.2	Geländediffusionskoeffizient und aktuelle CO <sub>2</sub> -Durchtrittsraten	54
6.2.3	CO <sub>2</sub> -Produktion	56
6.2.4	Bodenphysikalische Parameter	60
6.2.5	Feinwurzelverteilung	63
6.3	Einzelbaumbezogene Untersuchungen	63
6.3.1	CO <sub>2</sub> -Konzentration	63
6.3.2	Lagerungsdichte	65
6.4	Windinduzierte Wurzelbewegung	66
6.5	Qualitative Beobachtungen an Wurzeltellern windgeworfener Fichten	70
<b>7</b>	<b>DISKUSSION</b>	<b>73</b>
7.1	Flächige Aufnahmen	73
7.1.1	Räumliche Muster der Kohlendioxidkonzentration	73
7.1.2	Richtungsausprägung der Muster der CO <sub>2</sub> -Konzentration	74
7.1.3	Kohlendioxidkonzentration im 1-Meter-Radius um Fichten	75
7.2	Untersuchungen der voneinander abgegrenzten Kleinstandorte „Wurzelbereich lebender Fichten“, „Bereich alter Wurzelstöcke“ und „Zwischenstammbereich“	76
7.2.1	Tiefenprofile der Kohlendioxidkonzentration	76
7.2.2	Geländediffusionskoeffizient und aktuelle Kohlendioxid-Durchtrittsraten	79
7.2.3	CO <sub>2</sub> -Produktion	80
7.2.4	Bodenphysikalische Parameter	84
7.2.5	Feinwurzelverteilung	86
7.3	Einzelbaumbezogene Untersuchungen	86
7.3.1	CO <sub>2</sub> -Konzentration	86
7.3.2	Lagerungsdichte	87
7.4	Differenzierung von befahrungsbedingter Verdichtung und Strukturstörungen infolge windinduzierter Wurzelbewegung	89

7.5	Windinduzierte Wurzelbewegung	90
8	<b>SCHLUSSFOLGERUNG</b>	<b>95</b>
	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>99</b>
	<b>SUMMARY</b>	<b>103</b>
	<b>DANKSAGUNG</b>	<b>107</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>109</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>117</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>121</b>

## ZUSAMMENFASSUNG

Der langfristig negative Effekt der Befahrung von Forststandorten auf die Bodenstruktur, den Bodenlufthaushalt und somit auf das Wurzelwachstum der Bäume ist inzwischen hinreichend bekannt. Sollen alte Befahrungslinien entsprechend in der Forstpraxis gängigen Handlungsempfehlungen in ein neues, permanentes Feinerschließungskonzept übernommen werden, ist eine zuverlässige Detektion von Fahrlinien notwendig. Voraussetzung dafür ist die Kenntnis über die eventuell vorhandene natürliche Heterogenität bodenphysikalischer Parameter, welche üblicherweise zum Nachweis einer Befahrung herangezogen werden.

Ziel der Arbeit war es, mit Hilfe valider Methoden die räumliche Heterogenität von Bodenbelüftung und Lagerungszustand auf ausgewählten Standorten zu erfassen, die Ursache möglicher Muster zu bestimmen und Differenzierungsansätze zu befahrungsbedingter Verdichtung aufzuzeigen.

Die beiden Versuchstandorte „Heiligkreuztal“ und „Steinhausen“ liegen in Oberschwaben im Bereich der rißzeitlichen Grundmoräne. Die Standorte sind geprägt durch das strukturschwache, lehmige Ausgangssubstrat und Staunäseeinfluss. Die darauf stockenden, rund 90 Jahre alten Fichten haben in Folge der durch Staunässe eingeschränkten Durchwurzelungstiefe ein flaches, ausgedehntes Wurzelwerk ausgebildet. Bei den gegebenen Bestandeshöhen von 35 m und mehr kann davon ausgegangen werden, dass bei Starkwindereignissen hohe Windkräfte über das Wurzelwerk auf den Untergrund übertragen werden. Je Standort wurde in Anlehnung an die forstliche Standortskarte und anhand von im Gelände erkennbaren Merkmalen eine labiler eingeschätzte Fläche (HKT1, STH1) und eine stabiler eingeschätzte Referenzfläche (HKT2, STH2) in enger räumlicher Nachbarschaft dazu ausgewiesen. Der Referenzstandort in Heiligkreuztal zeichnet sich durch eine westexponierte Hanglage aus, bei der von einem verbesserten Wasserabzug und somit weniger starkem Staunäseeinfluss ausgegangen werden kann. Der stabile Standort in Steinhausen ist durch einen hohen Feinsandanteil geprägt und daher weniger verdichtungsanfällig.

Die Untersuchungen im Geländeversuch wurden auf drei hierarchischen Ebenen durchgeführt. Zunächst erfolgte auf allen vier Teilflächen eine **quasi flächige Messung** der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft, mit dem Ziel die Bandbreite der Heterogenität von Bodenbelüftung und Bodenstrukturierung zu erfassen und gegebenenfalls vorhandene Muster zu erkennen. Anhand der Ergebnisse dieser flächenhaften Aufnahmen konnten drei unterschiedliche Kleinstandorte voneinander abgegrenzt werden: der Wurzelbereich lebender Fichten („Fichte“), das Umfeld alter Wurzelstöcke („Wurzelstock“) und der „Zwischenstammbereich“. Zur Klärung der Ursachen für die Unterschiede zwischen den differenzierten Bereichen wurden auf der labilen Versuchsfläche in Heiligkreuztal (HKT1) **an den Kleinstandorten gezielte Untersuchungen** des Bodenlufthaushalts und von Bodenstrukturparametern durchgeführt. Darüber hinaus erfolgte eine **einzelbaumbezogene Betrachtung** von CO<sub>2</sub>-Konzentration und Lagerungsdichte im kleinräumigen Umfeld von Starkwurzeln.

Auf allen vier Versuchsflächen waren deutliche baumbezogene Muster, auf allen außer der stabil eingeschätzten Teilfläche in Steinhausen auch wurzelstockbezogene Muster erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration erkennbar. Die Ausprägung der Muster war allgemein in 20 cm

deutlicher als in 10 cm Bodentiefe. Der Radius dieser Areale lag zwischen einem und einhalb Metern um die Fichten und Wurzelstöcke. Für die Fichten wurde eher ein kontinuierlicher Konzentrationsabfall mit zunehmender Entfernung zum Stamm festgestellt, im Bereich der Wurzelstöcke trat die Zone mit den höchsten Konzentrationen zum Teil ringförmig in ca. 70 cm Entfernung auf. Eine klare Abhängigkeit der Musterausbildung von der vorherrschenden Windrichtung Südwest konnte nur auf der als stabil eingeschätzten Teilfläche HKT2 beobachtet werden. Dies wurde mit der westlich exponierten Hangsituation und den daraus resultierenden Veränderungen im Windverhalten erklärt.

Die bis in 90 cm Bodentiefe erhobenen Tiefenprofile der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft zeigten für alle drei Kleinstandorte einen Konzentrationsanstieg mit zunehmender Bodentiefe und auch der jahreszeitliche Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration war plausibel zu erklären. Zwischen den Kleinstandorten zeigten sich Unterschiede dahingehend, dass in der Regel der Teilbereich „Fichte“ in allen Tiefenstufen die höchsten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufwies, der Zwischenstammbereich die niedrigste. Der Bereich „Wurzelstock“ verhielt sich intermediär.

Zur Klärung der Frage, ob diese Unterschiede in der Konzentrationsverteilung tatsächlich auf eine Strukturstörung durch den Einfluss des Wurzelwerks zurückzuführen sind, oder ob räumlich begrenzt eine extrem hohe CO<sub>2</sub>-Produktion trotz günstiger Bodenstruktur zu einem Konzentrationsanstieg führen kann, wurde mit Hilfe eines Spline-Modells die horizontspezifische CO<sub>2</sub>-Produktion für die drei Kleinstandorte berechnet. Das Modell basiert auf den Tiefenprofilen der CO<sub>2</sub>-Konzentration und bezieht außerdem den aktuellen Diffusionskoeffizienten, die Bodenfeuchte und aus Geländekammermessungen ermittelte aktuelle CO<sub>2</sub>-Durchtrittsraten an der Bodenoberfläche ein. Die modellierte Verteilung der CO<sub>2</sub>-Produktion zeigte für alle drei Teilbereiche einen maßgeblichen Anteil von Humusaufgabe und Ah-Horizont an der Gesamtproduktion. In den mittleren Horizonten, in denen auch die flächigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationsmessungen durchgeführt wurden, ergab die Modellierung die höchsten Werte der CO<sub>2</sub>-Produktion für „Fichte“ und „Zwischenstammbereich“. In dieser Tiefenstufe scheint die CO<sub>2</sub>-Produktion in erster Linie an die Verteilung der Feinwurzelbiomasse gekoppelt zu sein, die für „Fichte“ und „Zwischenstammbereich“ ebenfalls eine höhere Dichte zeigt als für den Bereich „Wurzelstock“. Im Unterboden lassen sich aus dem Modell für „Fichte“ und „Wurzelstock“ noch nennenswerte Beiträge zur CO<sub>2</sub>-Produktion im Bodenprofil ableiten.

Beim Zusammenführen der Ergebnisse aus den Konzentrationsmessungen mit den modellierten Werten der CO<sub>2</sub>-Produktion wird deutlich, dass die Orte hoher CO<sub>2</sub>-Konzentration („Fichte“, „Wurzelstock“) in den relevanten Tiefenstufen bis 20 cm nicht deckungsgleich sind mit den Orten hoher CO<sub>2</sub>-Produktion („Fichte“, „Zwischenstammbereich“). Daraus wurde abgeleitet, dass die baum- und wurzelstockbezogenen Muster erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration in erster Linie Folge einer Strukturstörung in diesen Bereichen sind, die vermutlich auf windinduzierte Wurzelbewegung zurückgeführt werden kann.

Gestützt wird diese These von den Ergebnissen der bodenphysikalischen Untersuchungen, die für die Teilbereiche „Fichte“ und „Wurzelstock“ niedrigere Diffusionskoeffizienten, einen geringeren Anteil Poren mit einem Durchmesser größer 0,05 mm und einen höheren Anteil Poren kleiner 0,01 mm aufwiesen und somit eine im Vergleich zum Zwischenstammbereich verschlechterte Bodenstruktur anzeigen.

An Wurzeltellern windgeworfener Fichten in Heiligkreuztal wurden deutliche plattige Strukturen und eine ausgeprägte Rostfleckigkeit beobachtet, was einen mechanischen Einfluss des Wurzelwerks auf die tragende Bodenschicht anzeigt. Das Wurzelsystem der Bäume wies Merkmale einer windangepassten Architektur auf, wie sie in der Literatur beschrieben sind.

Die einzelbaumbezogenen Untersuchungen zeigen auf der windabgewandten Seite der Fichten einen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration zur Wurzelmitte hin, besonders in der Entfernung zum Stamm, in der die größte Wurzelauslenkung während eines Starkwindereignisses zu erwarten ist. Die Befunde der Bestimmung der Lagerungsdichte waren weniger deutlich, dies wurde in erster Linie der Entnahmemethode mittels kleiner Stechkappen zugeschrieben.

Am Standort Heiligkreuztal wurde an einer Fichte exemplarisch die Wurzelbewegung an je einer luvseitigen und einer leeseitigen Starkwurzel in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit aufgezeichnet. Während Starkwindereignissen konnte eine Bewegung der Wurzeln auf beiden Seiten sowohl auf- als auch abwärts festgestellt werden.

Eine Differenzierung von befahrungsbedingter Verdichtung und Bodenstrukturstörung infolge windinduzierter Wurzelbewegung konnte in erster Linie anhand der Befunde vom Standort Steinhausen vorgenommen werden, an dem eine Fahrspur in die Beprobung miteinbezogen wurde. Sowohl die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft als auch Merkmale für Strukturstörung, wie eine plattige Gefügeausbildung und redoximorphe Zeichnung des Bodens, waren im Bereich der Fahrspur bereits oberflächennah sehr viel stärker ausgeprägt als im Umfeld der Fichten. Hier treten die Kennzeichen gestörter Bodenstruktur und Bodenbelüftung erst ab 10 bis 20 cm Bodentiefe, also unterhalb der flach abstreichenden Starkwurzeln verstärkt in Erscheinung. Eine Ursachendifferenzierung kann auf den beprobten Standorten daher am zuverlässigsten über die Tiefe des Schadenseintritts vorgenommen werden.



## SUMMARY

It is meanwhile sufficiently known that machine use in forest stands negatively affects soil structure, soil aeration and subsequently the root growth of trees in the long term. To reuse former wheel tracks and skid trails in present and future logging operations in accordance with the established recommendations of practical forestry, a reliable detection of them is necessary. The precondition for this is knowledge about the natural heterogeneity of soil aeration and soil structure within investigated stands.

Aim of this thesis was to derive the spatial heterogeneity of soil aeration and soil structure at selected investigation sites by using valid methods and to determine the causes for these patterns. Furthermore, indicators for the differentiation of natural and machine induced compaction should be detected.

Both investigation sites "Heiligkreuztal" and "Steinhausen" are located in South-Western Germany, where parent materials for soil genesis are dominated by ground moraine deposits of the "Riss" glacial period. The loamy soils have a sensitive soil structure and are due to clay transport into the subsoil prone to waterlogging. Because of waterlogged horizons within the main rooting zone, rooting by the 90-year-old spruce trees is shallow but widespread in horizontal direction. As the trees reached heights of 35 m and more, wind forces are transferred by the root system to the ground below during periods with heavy wind and storms. At each site an area estimated as being instable (HKT1, STH1) as well as a stable reference situation (HKT2, STH2) in the close neighbourhood were selected according to the information of the forestry site map and indications for soil stability, which were visible in the field. The reference site at Heiligkreuztal is located at a hillslope with western exposition. There the drainage is better because the lateral water transport prevents waterlogging in the subsoil. The stable site at Steinhausen is characterized by a high percentage of fine sand and therefore less susceptible to compaction.

The investigations in the field were done at three hierarchical levels. First, a **two-dimensional measurement campaign of the CO<sub>2</sub>-concentrations in the soil** was carried out at all investigation sites in order to detect the heterogeneity of soil aeration and soil structure and to make out possible patterns. By means of these results three different small-scale locations could be distinguished: the root plate area of living spruces ("Fichte"), the vicinity of old stumps ("Wurzelstock"), and the intermediate zone between the stems and stumps ("Zwischenstammbereich"). At Heiligkreuztal, **investigations of soil aeration status and soil structure specifically relating to these locations** were performed in order to clarify the causes of the differences. Furthermore, a **single tree oriented analysis** of CO<sub>2</sub>-concentration and bulk density close to larger roots was carried out.

At all four investigation sites elevated CO<sub>2</sub>-concentrations were detected around the living spruce trees. Except for the stable site Steinhausen, this finding was confirmed for the surroundings of the stumps too. The patterns were generally clearer at a depth of 20 cm as compared to 10 cm. The areas with elevated CO<sub>2</sub>-concentration expand up to a distance of one and one and a half meter from the spruces and the stumps. Around the spruces a continuous decline of the CO<sub>2</sub>-concentrations with increasing distance to the stem was found, whereas in the vicinity of the stumps the highest CO<sub>2</sub>-concentrations were detected circularly in a distance of about 70 cm. A spatial orientation of this pattern according to the

predominant wind direction (South-West) could only be observed at the stable site HKT2. This was explained by the westward exposition of the hillslope and hence, the resulting change of the wind regime.

Profiles of the CO<sub>2</sub>-concentrations, which were collected for each of the three locations down to a depth of 90 cm, showed a progressive rise in the concentrations for all locations with increasing soil depth. In addition a seasonal course of the CO<sub>2</sub>-concentrations could be identified. "Fichte" was characterized by the highest CO<sub>2</sub>-concentrations for all depths, whereas the "Zwischenstammbereich" showed the lowest values. "Wurzelstock" had intermediate values.

To clarify, whether these differences in the allocation of CO<sub>2</sub>-concentrations were indeed the consequence of a disturbed soil structure caused by root movement and not an outcome of a higher small-scale CO<sub>2</sub>-production rate, the specific CO<sub>2</sub>-production rate for the horizons was calculated for all of the three locations using a spline-model. The model is based on the CO<sub>2</sub>-concentration profiles and also uses the current diffusion coefficient, soil moisture content and the current CO<sub>2</sub>-fluxes at the soil surface, which were determined with field chambers. The modelled CO<sub>2</sub>-production rate for the humus layer and the Ah-horizon played a key role in the overall production within the soil profile of all three locations. For the following two horizons down to a depth of approximately 45 cm, in which also the two-dimensional measurements of the CO<sub>2</sub>-concentrations took place, the model revealed the highest CO<sub>2</sub>-production rate for "Fichte" and "Zwischenstammbereich". In these depths, the CO<sub>2</sub>-production rate seems to depend predominantly on the intensity of fine rooting: the highest fine root densities were found for "Fichte" and "Zwischenstammbereich" and were lowest for "Wurzelstock". For "Fichte" and "Wurzelstock" the model provides a considerable contribution of the subsoil to the CO<sub>2</sub>-production rate.

Bringing together the results of the CO<sub>2</sub>-concentration measurements and the modelled data of the CO<sub>2</sub>-production rate it is evident, that for the depths down to 20 cm, the areas with increased CO<sub>2</sub>-concentrations ("Fichte", "Wurzelstock") do not correspond with the areas of high CO<sub>2</sub>-production rate ("Fichte", "Zwischenstammbereich"). Hence the conclusion is, that the patterns of increased CO<sub>2</sub>-concentrations around the trees and stumps are predominantly caused by a disturbed soil structure at these areas, which is attributed to wind induced root movement.

This theory is supported by the results of the soil physical investigations. For "Fichte" and "Wurzelstock" the diffusion coefficients and the proportions of pores with diameters above 0.05 mm are lower as compared to "Zwischenstammbereich". In addition in these locations the proportion of finer pores with diameters below 0.01 mm is higher. Thus we can conclude, that soil structure is negatively affected in the vicinity of living and dead spruce trees.

At the bottom of the root-plates of windthrown spruces at Heiligkreuztal, a laminar orientated aggregate structure and distinct redoximorphic properties were observed, which indicates an influence of the roots on the soil layer bearing the trees' weight. The root system of these trees shows characteristics of a wind adapted architecture as it is mentioned in literature.

The single-tree oriented investigations show a clear increase of the CO<sub>2</sub>-concentrations for the leeward side of the spruce trees, especially at that distance to the stem for which the

highest deflection of the roots is expected during wind events with high velocity. The results of the determination of bulk density using small caps were less clear, which was predominantly attributed to the sampling method.

At Heiligkreuztal the movements of a windward and a leeward primary root of a spruce and in addition the wind speed were recorded exemplarily. During the occurrence of strong winds an upward and downward movement of the roots could be detected at both sides.

A differentiation between soil compaction caused by the impact of heavy machines and by wind-induced root movement was determined based on the results of the Steinhausen site, where a wheel-track was part of the investigated area. Both, elevated CO<sub>2</sub>-concentrations in the soil and visible characteristics of a disturbed soil structure, such as platy or laminar structure and redoximorphic markings, were more distinct close to the soil surface in the wheel-tracks. In the vicinity of the spruce trees, the characteristics of a disturbed soil structure and soil aeration appear in a depth from 10 to 20 cm downward, thus below the shallow rooting zone of the primary roots. Hence, at the investigation sites the causes of soil structure damage can be differentiated according to their appearance in soil depth.