

# FORSCHUNG DER NEGATIVEN EINFLÜSSE DES BETRIEBES VON SCHWEREN FORSTMASCHINEN AUF FORSTBESTÄNDE

Jindrich Neruda und Radomir Ulrich

Institut für Forst- und Holztechnik  
Mendel-Universität für Land- und Forstwirtschaft Brno  
Zemedelska 3, CZ-613 00 Brno, Tschechische Republik  
[neruda@mendelu.cz](mailto:neruda@mendelu.cz)

**Schlüsselwörter:** Forstnutzung, schwere Forstmaschinen, Schäden an Waldbeständen

**Abstrakt:** *Die durch den Betrieb der schweren Nutzungsmaschinen in Forstbeständen verursachten Schäden wirken sich auf die Stämme der Bäume aus und ebenso auf ihr Wurzelsystem und auf den Boden. Sie entstehen während der Baumfällung, bei Manipulierung der Bäume und des Holzes und auch während des Maschinenverkehrs durch den Bestand. Negative Einflüsse auf den Boden und Wurzeln hängen mit mehreren Faktoren zusammen: Art des Fahrgestells, Bodendruck, Befahrenfrequenz, Gassenbreite, Bodenart und dessen Zustand usw. Untersucht wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten Bodendruckverläufe in einer Tiefe von 10-15 cm unter der Oberfläche und einige physikalische Bodenparameter nach Kreisfahrten von Harvester und Forwarder. Die Bewertungen erfolgten auf verschiedenen Lokalitäten in Tschechien. Die Durchschnittswerte der Bodendrücke der geprüften Maschinen lagen bei breitem Bereich von 0,1 bis 3,9 Bar, die Höchstwerte des Bodendrucks einiger Maschinen lagen jedoch deutlich höher. Einfluss der schweren Maschinen auf die Wurzelsysteme der Fichte wurde auch mittels Messung des Transpirationsstromes in Stämmen und Skelettwurzeln der Bäume ermittelt. Es wurde dabei eine unikale Methode der Messung von Deformation des thermischen Feldes im Holz unter Verwendung der Ein- und Mehrpunktsensoren eingesetzt.*

Bei Durchforstungen in allen Alterskategorien der Waldbestände und deren Erneuerung wächst Umfang des Einsatzes von progressiven Nutzungstechnologien, die mobile Mechanisierungsmittel (insbesondere Nutzungsmaschinen und Forwarder) benutzen, die gegenüber den motomanuellen Technologien ermöglichen, die Arbeitsproduktivität sowie Arbeitssicherheit zu erhöhen, die Gesundheitsrisika herabzusetzen und die Holzevidenz zu vereinfachen u. ä. m. Bei Betrieb dieser Maschinen entstehen verschiedenartige Schäden an den Bestandesbäumen, wobei jedoch die sog. hoch mechanisierten Nutzungstechnologien ein niedrigeres Schädigungsniveau am Baum aufweisen gegenüber den klassischen Technologien (Neruda 2000a, b).

Die meisten eingesetzten Maschinen besitzen beträchtliche Masse und werden mit Radfahrgestellen versehen. Bei deren Befahren entstehen auf den Waldböden ungünstige Strukturänderungen, die nach den Forschungsergebnissen Verluste an der Waldproduktion von 17 und mehr Prozenten (Becker 1999) verursachen können. Die Beschädigung der Wurzelsysteme von anliegenden Bäumen kann man auch bei der gerichteten Maschinenbewegung nur auf den abgegrenzten Trajektorien – Rückegassen – erwarten. Man kann einen direkten Zusammenhang zwischen dem Umfang der Bodenschädigung und Beschädigung der Baumwurzeln und der Befahrenhäufigkeit der Maschinen nach den Rückegassen, dem Gewicht, spezifischem Fahrgestellendruck, Bodencharakter, Wetter und den weiteren Einflüssen erwarten (McMahon, 1995).

Durch Wechselbeziehung zwischen der Radarbeitsmaschine – Energiequelle, des Vorsatzes oder Aggregats und der Bodenoberfläche des Bestandes bei Nutzungs- und Transportarbeiten werden im Boden Drücke hervorgerufen, die vor allem vom Niveau des Reifenaufpumpen, deren Steife und der Adhensionsbelastung des Traktionsmechanismus abhängig sind. Der Reifendruck wird auf die Bodenoberfläche des Waldbestandes in der Berührungsfläche übertragen. Laut dem Druck im Reifen, der Adhensionsbelastung, den Komponenten der Radtraktionskraft, entstanden durch die Wechselbeziehung des übertragenen Drehmomentes wirkt sich ein Reifen auf den Boden mit dem spezifischen Druck von bestimmtem Wert und hierdurch wird dieser in verschiedene Bodentiefe hineingedrückt in Abhängigkeit von seinem momentanen Zustand. Infolge der Reifeneindrückung in die Bodenoberfläche kommt es zu den Deformationen der oberen Bodenschichten, die bis zur Furchenbildung führen, deren Tiefe und Breite insbesondere von Reifentyp, deren Belastung, Oberflächenstand, Bodenfeuchtigkeit und Durchfahrtszahl abhängig ist.

Werte der Parameter dieser Abhängigkeiten können registriert und verwendet werden bei Kriterienbearbeitung der Konsequenzen des Befahrens von verschiedenen Forstmaschinen, vor allem jedoch der Forwarders, die höchste Belastung aufweisen, hergeleitet sowohl aus dem Gewicht der eigenen Maschine als auch der Last, die

je nach Maschinentyp von ca. 10 bis 20 Tonnen betragen. Z. B. ein Forwarder von Mittelklasse ROTTNE Solid F 9, der eigenes Gewicht von 10 600 kg besitzt und Last von 9 000 kg zu transportieren vermag, ist mit 4 Niederdruckreifen mit Abmessungen von 600/50 versehen. Bei Kontaktfläche eines Rads von ca. 4 200 cm<sup>2</sup> beträgt der spezifische Druck auf den Boden von ca. 0,12 MPa (1,2 bar).

Die von der Maschinenschwere hergeleiteten Einflüsse stellen u.a. **zwei Problemkreise** dar:

- **Primärwirkung** der schweren Forstmaschinen mittels Wirkung der Drücke bei deren Befahren (Schlepper mit Last in Halbaufhängung, Harvesters und Forwarders, belastet durch Holzabschnitte) verursacht direkte Wurzelschäden, und zwar sowohl Schaden an starken Wurzelpartien, der vor allem bei flach wurzelnden Baumarten (typisch ist Fichte) zu beobachten ist als auch Schaden an Absorptionszonen an den dünnsten Wurzelteilen
- **Sekundärwirkung** der Maschinen, die den Boden zeitweilig oder anhaltend zusammendrücken, was z. B. Veränderungen an Wasserabsorptionsfähigkeit durch den Boden, Veränderung der Bodendurchlässigkeit für Luft und Wurzeln etc. zur Folge haben.

Es ist bekannt, dass sich ein in den Boden übertragenes Druckniveau mittels Reifens von gegebenem Typ, Aufpumpen und Belastung in Abhängigkeit von Tiefe, in der die Verfolgung verläuft, ändert (reduziert), weiter in Abhängigkeit von Decke der Bodenoberfläche, von Vorkommen der groben und armerenden Bodenbestandteile etc. Für Vergleich der Folgen der Befahreneinflüsse auf den Wurzelsystemstand ist somit höchstens erwünscht, entsprechende momentane Druckwerte zu erkennen, die eventuelle Änderung des Wurzelstandes hervorgerufen haben.

Deswegen wurde im Rahmen der Forschungsuntersuchung jene Methode erstellt und verwendet, die solche Angaben liefern kann. In der **Methode der Messung der momentanen Bodendrücke** wurde eine unikate Messkette herangezogen, zusammengesetzt aus drei hydraulisch-elektronischen tensometrischen Druckfühlern (Sensoren), hineingelegt am Messort (am Ort des künftigen Überfahrens von Reifen), dem analog-digitalen Messwertwandler DAS und transportablen Computer zur Eintragung und Auswertung der Daten. Zurzeit ist die Geräteketten zum Anschluss von insgesamt sieben tensometrischen Druckfühlern modifiziert.

Die Fühler setzen sich aus mehreren Grundteilen zusammen: aus zylindrischem Kunststoffgefäß mit Durchmesser von 30 mm, gefüllt mit Flüssigkeit, entlüftet und verbunden mit armiertem Gummischlauch mit eigenem tensometrischem Geber, Typus ZPA 114 48. Fühler bzw. Kunststoffgefäße können in den Boden grundsätzlich in jeder Tiefe hineingelegt werden. Aufgrund der Ergebnisse der früheren Untersuchungen (z. B. Neruda, 2000 und 2002) wurde die Untersuchung auf die obere Bodenschicht ausgerichtet, d.h. Bodentiefe der Druckfühler betrug von ca 10 – 15 cm unter der Bodenoberfläche. Diese Tiefe wurde deswegen gewählt, weil gerade in dieser Zone bei den flach wurzelnden Baumarten (Fichte) eine grosse Menge von Wurzeln vorkommt, die der grössten Gefahr der Bodenschädigung bei Befahren der Reifen von schweren Forstmaschinen ausgestellt sind.

Methodisch ist es wichtig, dass die Fühler in den Boden am Ort der Achse der künftigen Radspur von Seite in horizontal gebohrte kalibrierte Öffnung hineingelegt sind. Die Bodenschichten über dem Fühler sind nicht verletzt. Die gewählten Fühler sind imstande, Drücke zwischen 0 und 2 MPa mit Genauigkeit von 1 % zu registrieren. Zur Kontrolle und Erreichung einer mehrfachen Druckmessung wurden bei Druckmessung im Boden die Fühler unter der künftigen Spur als Dreierheit mit Abstand von ca. 30 cm hineingelegt bzw. so verteilt, um es möglich wird, Abläufe der Druckveränderungen im Boden in Abhängigkeit von dessen Eigenschaften oder Reisischichtdecke zu erfassen.

Bei Forschungsuntersuchung wurde Simulation der wiederholten Befahren von schweren Forstmaschinen auf den Radfahrgeräten auf der Versuchsfläche im Fichtenbestand mit genau definierten Werten von Befahrenhäufigkeiten (10 mal) auf derselben Trajektorie (Rückegasse), Aufpumpen und spezifischen Reifendruck verwendet. Gemessen wurden momentane Drücke in Bodentiefe von ca 10 - 15 cm unter der Oberfläche bei Reifenbefahren, Breite und Tiefe der eingedrückten Radspuren und Veränderungen des Penetrationsbodenwiderstands und ermittelte Bodengrundcharakteristiken und ihre durch die Befahren verursachten Veränderungen.

Die Druckverhältnisse in Bodentiefe von 10 – 15 cm wurden unter zweierlei Bedingungen ermittelt: im Boden mit nicht gedeckter Oberfläche und im Boden mit Decke von Fichtenreisigschicht mit Stärke zwischen 20 und 80 cm (hierdurch wurde übliche Lage simuliert, wo bei Forstnutzung mittels Harvesters die Rückegassen, auf denen sich diese schweren Forstnutzungsmaschinen und nachfolgend auch Forwarders bewegen, werden die Rückegassen zwecks des Boden- und Baumwurzelschutzes beabsichtigt mit Reiserschicht gedeckt).

Zur Simulation der Bodenbelastung durch eine schwere Maschine wurde zuerst als Belastungsmittel Zweiradanhänger mit Last von Stahlplatten verwendet, gezogen durch den Universalschlepper und versehen mit Reifen 10,5/16 Chemlon Ply Rating, aufgepumpt auf Wert von 0,2 MPa. Gesamtgewicht des Anhängers betrug von 3 300 kg, woraus man unter gegebenen Bedingungen bei Kontaktfläche mit Bodenoberfläche jedes von

Reifen von 770 cm<sup>3</sup> den verhältnismässig hohen spezifischen Druck der Reifen des Anhängers auf den Boden von ca. 0,2 MPa berechnen kann, also den vergleichbaren oder sogar höheren spezifischen Druck gegenüber den Druck bei schweren Forstmaschinen. Der Schlepper an sich ist mit den Niederdruckreifen Trelleborg TWIN 600/60-330,5 versehen (Protectorbreite von 600 mm), aufgepumpt auf Wert von 0,1 MPa, die auf der gegebenen Lokalität einen spezifischen Druck auf Boden von ca. 0,07 MPa verursachten, also, ausgeprägt kleineren als der Druck unter den Anhängerrädern war. Beispiel der Druckmessung bei Prüfsatz ist Tab. Nr. 1 zu entnehmen.

**Tab. 1: Bodendrucke in Tiefe von 10 cm unter der Bodenoberfläche, verursacht durch Befahren des geprüften Satzes (Schlepper mit Anhänger)**

Bodenoberfläche	Durchschnittswerte der Bodendrucke bei Befahrenhäufigkeit (MPa)			
	2 Befahren	4 Befahren	6 Befahren	10 Befahren
ohne Reisigdecke	0,09	0,09	0,10	0,11
Reisigdecke – 20 cm	0,03	0,04	0,07	0,06

Weitere Messungen des Ablaufs der Bodendrucke erfolgten mit den tatsächlichen schweren Forwarders, deren Aufzählung Tab. Nr. 2 zeigt.

**Tab. 2: Übersicht über Messungsergebnisse der Bodendrucke, verursacht durch Befahren von schweren Maschinen auf verschiedenen Lokalitäten**

Lokalitätsbezeichnung	Maschine	Gesamtgewicht (kg)	Spezifischer Bodendruck max. (bar)	Boden		Reisigschichthöhe		Druck im Boden max. (bar)	Penetration-widerstand (daN)	
				Charakteristik	Feuchtigkeit (%)	vor Befahren (cm)	nach Befahren (cm)		vor	nach
Jedovnice 289 C3Z Fichte 100%, 40 Jahre	einachsiger Anhänger	3 300	2,1	0-6 cm typischer Moder, 6-8 cm Humuserde, 8-15 cm brauner Lehmboden, 15-30 cm hellbrauner Lehmboden	33			1,2	6,5	19,0
Vranov - Fläche A 20C3b Fichte 70%, 40 Jahre	FMG Mini Bruunett 678	17 950	1,1	modale Kambierde, 0-2 cm Humusmoder, 2-11 cm dunkelgrauer Sandlehmboden, 11-40 cm weissegelber Lehmsandboden	8	50	17	4,0 4,0 5,0	20,0 20,0 20,0	20+ 20+ 20+
Vranov - Fläche B1 17C3 Fichte 70%, 40 Jahre	einachsiger Anhänger	3 300	2,1	gegleydenere Kambierde, 0-10 cm braunschwarzer Lehmboden, 10-25 cm gelber Lehmsandboden mit Skelett	38			1,6 1,3	10,3 10,3	17,5 16,8
Vranov - Fläche B2 17C3 Fichte 70%, 40 Jahre	FMG Mini Bruunett 678	17 950	1,1	gegleydenere Kambierde, 0-10 cm braunschwarzer Lehmboden, 10-25 cm gelber Lehmsandboden mit Skelett	38			3,5 1,4	12,7 12,7	19,5 19,4
Nová Ríše bei Telč Fläche A Fichte 80%, 50 Jahre	FMG Mini Bruunett 678	16 500	1,0	0-20 cm gelbbrauner Lehmboden mit Sand und Skelett, 20-30 cm weissgrauer Lehmboden, stark gegleydener	28	35	16	2,8 2,5 1,6	5,5 5,5 5,0	12,0 7,0 6,0
Nová Ríše bei Telč Fläche B Fichte 80%, 50 Jahre	FMG Mini Bruunett 678	16 500	1,0	0-20 cm gelbbrauner Lehmboden mit Sand und Skelett, 20-30 cm weissgrauer Lehmboden, stark gegleydener	38	40	22	1,8 1,2 1,3	7,5 7,5 7,5	17,0 17,0 21,0
Nová Ríše bei Telč Fläche C Fichte 80%, 50 Jahre	FMG Mini Bruunett 678	16 500	1,0	0-20 cm dunkelgelbbrauner Sandlehmboden, 20-30 cm weissgrauer Lehmboden, gegleydener	21			5,0 3,0 -	18,0 18,0 17,0	25,0 25,0 23,0
Cikar Fläche A Fichte 90%, 80 Jahre	LogBear 4000	5 900	0,4	0-20 cm Moor mit Sand, 20+ hellbraunerweicher Sand	29	30	19	0,9 1,1 0,6	7,0 7,0 7,5	7,5 7,5 8,2
Cikar Fläche B Fichte 90%, 80 Jahre	Nokka Forwarder 24 WD	11 600	0,5	0-20 cm Moor mit Sand, 20+ hellbraunerweicher Sand	39	30	18	0,6 0,7 0,5	5,0 5,0 5,0	5,0 5,0 5,0
Cikar Fläche C Fichte 90%, 80 Jahre	Valmet 840.1	23 600	1,2	0-25 cm Moor mit Sand, 20+ hellbraunerweicher Sand	30	45	25	0,2 0,3 0,1	5,5 5,5 5,5	5,6 5,6 5,5
Cikar Fläche D Fichte 90%, 60 Jahre	Valmet 840.1	23 600	1,2	0-5 cm Moder, 5+ hellbrauner weicher Sand mit Mineralstoffen	13	36	20	2,4 2,1 0,9	16,0 16,0 16,0	24,0 24,0 24,0
Jeseniky Gebirge - Skřítek Fichte 90%, 90 Jahre nach Kahlschlag	Timberjack 1110 D	24 400	0,9	0-5 cm Moder, 5+ cm brauner Lehmboden, kleines Skelett	33	38	17	3,3 3,4 3,8	6,0 6,0 6,0	8,0 8,0 8,0
Račín bei V. Dářko Fläche A Fichte 95%, 70 Jahre	FMG Mini Bruunett 678	16 970	1,0	Pseudogley kambisch, 0-5 cm typischer Moder, 5-12 cm schwarzbrauner Humuslehmboden, 12-20 cm brauner Lehmboden, 20+ cm kambische	15	40	15	1,8 0 1,2	10,0 10,0 10,0	18,0 18,0 16,0
Račín bei V. Dářko Fläche B Fichte 95%, 70 Jahre	FMG Mini Bruunett 678	16 970	1,0	Pseudogley modal, 0-7 cm Moor, 7-17 cm Marmorerde, 17-42 cm grauschwarzer Boden mit Marmorereffekt	21	38	15	2,3 3,5 1,7	9,0 9,0 9,0	13,0 13,0 13,0

### Ermittelte Ergebnisse des Ablaufs von Bodendrucke

Die an in Tiefe von 10 – 15 cm unter der Bodenoberfläche hineingelegten Fühler ermittelten Druckverhältnisse erreichten Werte in einer breiten Skala zwischen 0,09 und 0,7 MPa auf den mit keinem Reisig gedeckten Flächen (es handelt sich um die Spitzenwerte der gemessenen Bodendrucke, von deren ist es möglich, die schädlichste Wirkungen zu erwarten). Evidente Unterschiede gibt es in manchen Fällen im Vergleich der Werte des gerechneten spezifischen Bodendruck und dem gemessenen Bodendruck. Diese sind oft höher und das kann man erklären durch die dynamische Wirkung der Maschinenbewegung. Die Werte des Bodendruckes auf den Flächen mit Reisigdecke im Vergleich der Werte des Bodendruckes auf den Flächen mit keiner Reisigdecke sind

offenbar niedriger. Das ist eine sehr positive Feststellung, die die Bedeutung der von der Forstpraxis realisierter Massnahme unterstützt.

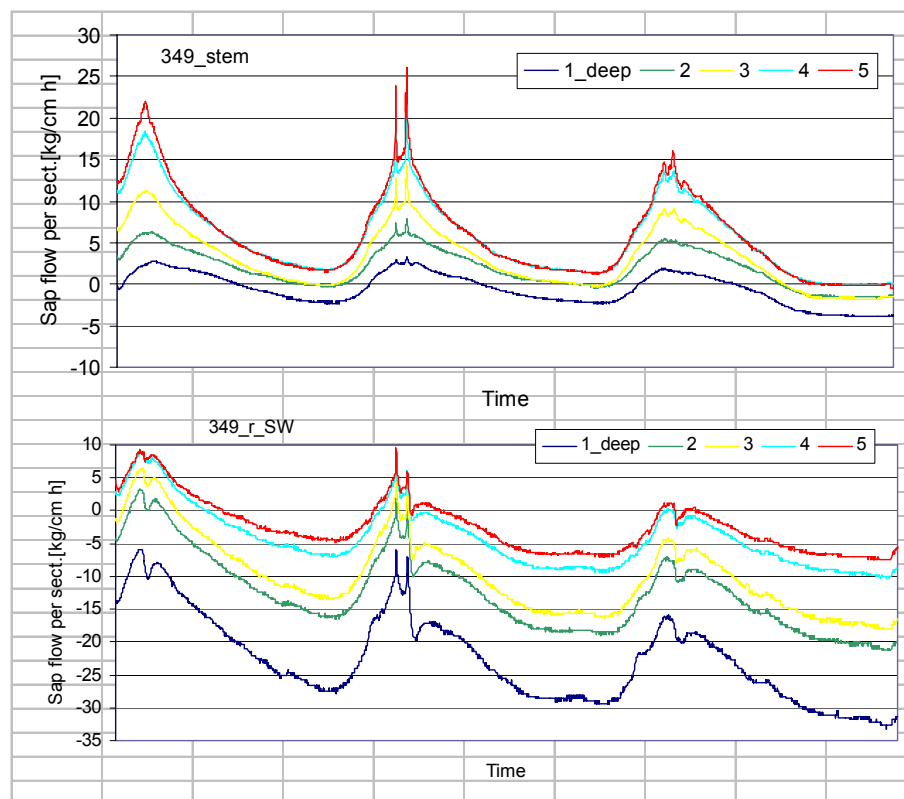
Aus den Messungsergebnissen geht hervor, dass der ermittelte Ist-Druck in so niedriger Tiefe von 10 cm unter der Bodenoberfläche niedriger ist gegenüber dem Wert des spezifischen Drucks des Reifens, berechnet aus der Belastungsgrösse und Grösse der Kontaktfläche des Reifens. Eine positive Wirkung dank der Reisischicht wurde verzeichnet, weil sich diese dabei an der Druckverteilung im Boden, verursacht durch Befahren von Reifen, beteiligte.

### Ermittlung der Folgen von Druckwirkungen im Boden auf die Wurzelsysteme

Mit Rücksicht darauf, dass die Drucksonden in den gleichen Bedingungen hineingelegt wurden, wie sich die Baumwurzeln befanden, bei denen Messungen erfolgten, ist es herzuleiten, dass den ähnlichen Drücken, wie Tab. 1 und 2 anführt, auch die Wurzeln ausgestellt worden sind, bei denen im Rahmen einer weiteren Untersuchung bei Lösung des Grantprojekts Nr. 526/02/0792 „Methoden zur Verbesserung der Determination der Wurzelschäden in den Fichtenbeständen durch Forwarders“ physiologische und morphologische Veränderungen der belasteten Wurzeln komplexerweise aus mehreren Gesichtspunkten ermittelt wurden. Dabei wurden **mehrere Originalverfahren** benutzt:

Zur Messung der Wurzelreaktion wurde zum erstmaligen Kombination der **Messungsmethode des Transpirationsstromes im Gewebe mit genauer Lokalisierung der Wurzeln** hinsichtlich der Radspur des Befahrens von Schleppern aufgrund der Raumaufnahmen des Bodenprofils der Versuchsfläche mittels Pulsradargeräts (PULS EKKO 1000 der Fa. Sensors and Software Kanada) herangezogen. Kontrolle der Wurzellokalisierung erfolgte nach Beendigung der Messung mit Hilfe von deren Abdeckung mit Technik des Überschall-Luftstromes. Der Transpirationsstrom wurde in Stämmen und einzelnen Sketelettwurzeln in der Nähe des Stammes von Z-Bäumen mittels Methode der Deformation des thermischen Feldes gemessen. Insgesamt wurden bis auf 90 Fühler, verteilt bei Gesamtheit von Probestämmen je Fläche, verwendet. Die gewonnenen Daten wurden von Messzentralen EMS/UNILOG (Brno, CZ) und DL2e (Delta T, GB) registriert.

**Abb. 1 Beispiel der Reaktion des Transpirationsstromes auf das Befahren der Wurzeln durch Maschine**



Bei Reihe von Wurzeln wurde keine Reaktion ermittelt, was scheint überraschend zu sein bis zur Zeit, wo eine zusätzliche Abdeckung zeigte, dass die Wurzeln, deren sichtbaren Anläufe in Befahrentrajektorie gerichtet wurden, sich in der Erde gedreht und die Trajektorie nicht reichen. Die Reaktion der direkt betroffenen Wurzeln durch Befahren äusserte sich durch den steilen Stromanstieg von mehreren Minuten und nachfolgend

auch durch seinen gleich steilen Rückgang, und zwar auf ein niedrigeres Niveau als vor dem Befahren bei jeder von Befahrenserien der Fall war. Beispiel der Reaktion des Transpirationsstromes zeigt Abb. 1. Der grösste Rückgang wurde in mittleren und tieferen Xylemschichten beobachtet, während in den Oberflächenschichten der Rückgang kleiner war. Die zusammengefasste Bewertung zeigte, dass die Reaktion des Transpirationsstromes nur dann zum Ausdruck kommt, soweit durch das Befahren ein bedeutender Wurzelteil betroffen worden ist (der durch Gesamtfläche ihrer Projizierung gegeben ist), der sich bis zur bestimmten Tiefe unter der Oberfläche befindet. Bei den tiefer wachsenden Wurzeln äusserte sich keine Reaktion. Die bisherigen Ergebnisse bestätigen, dass aufgrund der Messung des Transpirationsstromes möglich ist, Bedingungen vorläufig zu charakterisieren, unter denen das Befahren von Mechanismen die Wurzeln beschädigt sowie diejenigen, bei denen zur keinen Beschädigung kommt.

Der Transpirationsstrom reagierte also auf die Belastung durch Räder von schweren Maschinen dreierlei:

- mit keiner sichtbaren Reaktion – ähnlich wie bei der unbeeinflussten Kontrolle
- mit momentaner Reaktion (durch Erhöhung des Transpirationsstromes) auf jede einzelne Serie von dicht aufeinander folgenden Befahren
- mit kontinuierlicher Reaktion, wo sich der Transpirationsstrom nach jedem Befahren zu erhöhen begann

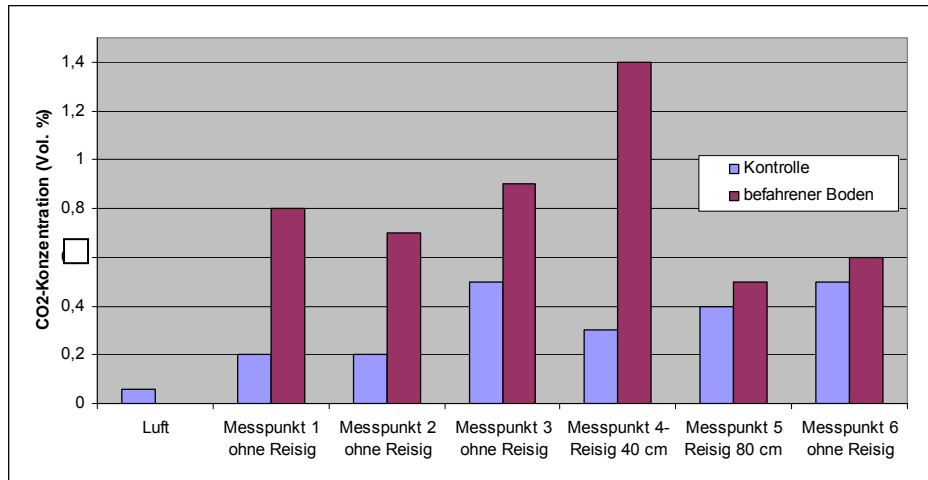
Jeder Typ der Reaktion wurde bei Stämmen und Wurzeln verschiedener Stämme der Probestämme beobachtet. Die beobachteten Reaktionen des Transpirationsstromes waren sehr schnell, sie entsprachen jedoch den in früheren Studien ermittelten Reaktionen (Nadezhdina und Čermák 2000a, 2000b, Nadezhdina et al. 2003). Die auf dem trockenem, verhältnismässig harten Boden wachsenden Fichtenwurzeln reagierten auf das Befahren von schweren Maschinen zwar empfindlich, aber nur kurzfristig und durch das Befahren waren offensichtlich wesentlich weniger (fast nur geringfügig) beeinflusst im Vergleich zu den ähnlicherweise beeinflussten Wurzeln derselben Art von den auf dem feuchten Boden wachsenden Wurzeln. Die auf dem in grösseren Tiefen ebenfalls trockenem, aber auf der Oberfläche kurz vor den Versuchen nach dem Niederschlag angefeuchteten Boden wachsenden Fichtenwurzeln reagierten nicht nur kurzfristig, sondern verzeichneten ausgeprägte Funktionsschädigung. Dies stimmt mit den bereits beschriebenen Ergebnissen (Neruda et al. 2003, Nadezhdina et al. 2003) überein.

Zur Messung der Schäden an unter der Erdoberfläche wachsenden Wurzeln der Baumarten, hervorgerufen durch das Befahren von schweren Maschinen, wurden auch weitere physikalische Prinzipien herangezogen u. a. **elektrische Messung der sog. Absorptionszonen an Wurzeln** der Baumarten. Gewonnen wurden dabei wichtige Ergebnisse, die zeigten, dass die Messungsmethode der Absorptionszonen trotz ihrer technologischen Kompliziertheit zum Studium sowie zur Messung der Wurzelschäden der Bäume durch Befahren von schweren Maschinen gut zu verwenden ist. Nähere dazu siehe Koller u. Koll. (2003), Ulrich und Neruda und Staněk (2004).

Befahren von schweren Maschinen auf dem Boden verursacht bedeutungsvolle Veränderungen der Bodenstruktur, die sog. Verdichtung, was von manchen Autoren bereits behandelt worden ist. Bei Verdichtung kommt es zur Herabsetzung der Bodenporigkeit und dessen Luftkapazität. Verschlechtert wird die Bodenventilation und es kann auf diese Weise zur Anhäufung von CO<sub>2</sub> a zur Erhöhung seines Anteils an Bodenluft kommen. Mit Hilfe von **Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft** kann der momentane Zustand der Bodenventilation beurteilt werden. Die verschlechterte Bodenventilation kann bis zur Unterbrechung des Wachstums von Feinwurzeln führen. Insbesondere in den Böden mit höherem Tongehalt können undurchlässige Schichten entstehen, die bei der erhöhten Feuchtigkeit sogar Absterben der Wurzeln verursachen können. Hierdurch kann die Stabilität des Standortes bedroht werden. Des weiteren kann ein Trockenstress vorkommen, der auf kleines Porenvolumen oder reduzierte Bodenwasserkapazität zurückzuführen ist (Güldner 2002). Dementsprechend wurden im Laufe des ersten Halbjahres 2004 in die Untersuchungsarbeiten neu auch die mit der Ermittlung des CO<sub>2</sub> in der Bodenluft verbundenen Aktivitäten einbezogen. Gesucht wurde Methode, die ermöglicht, in den Feldbedingungen sowohl die momentanen Werte des CO<sub>2</sub>-Gehalts zu messen als auch ihre Entwicklung mit Zeit zu registrieren. Die bis jetzt verwendeten Methoden auf Basis des Gaschromatographes (Güldner 2002) waren nicht zugänglich und hinsichtlich der Anforderung, den zeitlichen Ablauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft zu registrieren, auch nicht besonders geeignet. Erstellt wurde eine Methode, gegründet auf Basis der Geräte von finnländischer Firma Vaisala, zusammengesetzt aus dem GMT 221- Messgerät der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der GMP 221-Mess-Sonde mit Grundmessbereich bis auf 3 % CO<sub>2</sub> und Messgenauigkeit von 0,02 %. Die Sonde basiert auf Messung der Absorption des Infrarot-Strahles von in der Luft enthaltenem CO<sub>2</sub>. Diese Geräte wurden in eine Messkette angeordnet, die weiter Temperaturmessgerät, Dataloger und Speisequellen umfasste. Für Mess-Sonde wurde eine mit Stopfen verdichtete Hülse und eingebautem Sondenkörper gebildet, die in eine kalibrierte Öffnung im Boden immer in Tiefe von ca. 12 cm hineingelegt wurde.

Die eigenen Messungen erfolgten mit zwei Sonden, von denen die eine in den durch Befahren von Forwarders verdichteten Boden und die andere in den Boden ohne Befahren angebracht wurden. Erste gewonnene Ergebnisse sind Abb. Nr. 2 zu entnehmen. Der Boden an den Versuchsflächen war lehmig mit verschiedener Skala der Feuchtigkeit (von niedriger Feuchtigkeit des Boden am Messpunkt 1 zum nassen Boden an Messpunkten 5 und 6). Der Boden an den Messpunkten war immer 10mal durch den Forwarder FMG Mini Bruunett 678 (Gesamtgewicht 18 000 kg, Bereifung 600 mm) befahren.

**Abb. 2: Ergebnisse der Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft in dem durch Befahren von Maschinen verdichteten Boden**



Obzwar die von uns bis jetzt durchgeführte Zahl von Messungen des CO<sub>2</sub>-Gehalts im Boden nicht sehr umfangreich ist, kann man überraschend signifikante Ergebnisse beobachten, die auf die beträchtlich verschlechterten Ventilationseigenschaften des Bodens in den Radsuren, verdichtet durch Räder von Forwarder gegenüber den Kontrollflächen, hinweisen. Wenn die Konzentration von 0,06 % CO<sub>2</sub> in der Bodenluft für den Grenzwert gehalten ist, die gewichtige Veränderungen der Bodenstruktur mit fatalen Folgen für das Wurzelwachstum (Gaertig 2001) verursacht, dann wurden von uns fast in allen Fällen ausgeprägte Überschreitungen dieses Wertes ermittelt, die in einigen Fällen sogar ein Mehrfaches betragen. Diese Veränderungen im Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration treten auch nach einem einzigen Befahren von schwerer Maschine auf der Bodenoberfläche auf, was einige von uns durchgeführte Orientiermessungen nachgewiesen haben.

Die bei Verwendungen der Methode zur Messung des CO<sub>2</sub>-Gehalts ermittelten Ergebnisse mit der angeführten Geräteketten weisen auf die wichtige Tatsache des ausgeprägten Anstiegs der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Bodenluft auf den Waldböden, verdichtet durch den Einfluss von Befahren von schweren Maschinen (d.h. beim wiederholten Befahren auf den Rückegassen und bei einzelnen Befahren durch den Bestand), hin. Hierdurch kann es zur Beschränkung oder sogar zur Ausschaltung der Tätigkeit eines Teils des Wurzelsystems der Bäume, also, zum Verlust eines Teils der aktiven Oberfläche der Wurzelzone, kommen.

Umfang der Wurzelschäden durch das Befahren von schweren Maschinen wurde im Rahmen der Forschungsuntersuchung auch aus detaillierter biologischer Sicht der Veränderungen im Zellengewebe der Wurzeln (Gebauer und Martinková 2003) beurteilt. Bei Befahren von Maschinen, die Verdichtung des Oberhorizontes und seine Eindrückung in feuchtere Bodenschichten verursachen, war verhältnismässig häufig ein Verletzungstress zu beobachten, d.h. häufiges Abreißen der oberflächlichen und unverholzten Gewebesysteme und Zerreißen der feinen Endwurzelklaster beobachtet. Man kann daraus schliessen, dass die Wurzeln imstande sind, den anhaltenden Drücken gut zu widerstehen und derart zu reagieren, um ihre Funktion möglichst optimal aufrechtzuerhalten. Die Druckschläge auf die struktural unvorbereiteten Wurzeln auch unter den niedrigeren Werten können auch fatale Konsequenzen bis völliger Wurzeldestruktion zur Folge haben. Belastung für den Baum liegt dann im Verlust eines bestimmten Teils des Wurzelsystems und Bedarf, diesen zu ersetzen oder Wurzelwunden zu heilen.

### Schlussfolgerungen

- Bewegung der schweren Forwarders auf den Rückegassen in den Waldbeständen wirkt sich auf die Baumwurzeln, obzwar man bei denen keine Veränderungen beobachten kann.
- Beschädigt sind nämlich die Oberflächenwurzeln bis Tiefe von ca. zwischen 10 und 15 cm, bei den durch dickere Bodenschicht geschützten Wurzeln wurde keine Beschädigung sowie keine Reaktion auf das Befahren beobachtet.

- Beschädigung der Wurzelfunktion ist signifikant grösser auf den verhältnismässig weichen feuchten Böden, während auf den trockenen verhältnismässig harten Böden, die durch Befahren nicht deformiert sind, reagieren die Wurzeln nur kurzfristig und es kommt nicht zu einer anhaltenden Beschädigung ihrer Funktion.
- Bodenveränderungen mit potentialer unerwünschter Wirkung auf die Baumwurzeln treten bereits nach einem einzigen Befahren von schweren Maschinen auf. Es ist notwendig, das Verbot ihrer Bewegung ausserhalb der ausgezeichneten Rückegassen zu erfordern.

### Literatur:

Becker, G. (1999): Verfahrenstechnik und Arbeitswissenschaft nach dem Jahr 2000. Referát, 1. Zusammenkunft der Sektion Forsttechnik, Freiburg, s. 53-56

Gaertig, T. (2001): Bodengashaushalt, Feinwurzeln und Vitalität von Eichen. Dissertation Universität Freiburg in Breisgau, (in Güldner 2002)

Güldner, O. (2002): Untersuchungen zu Bodenveränderungen durch die Holzernte in Sachsen und Entwicklung eines Konzepts zur ökologisch verträglichen Feinerschliessung von Waldbeständen. Tagungsbericht Treffen der „Sektion Forsttechnik“ des Verbandes Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten, Sopron, 2002.

Koller, J. und Aubrecht, L. und Staněk, Z. (2003): Electrical methods of the measurement of the sapwood depth of woody species. *Sborník referátů z II. mezinárodní vědecké konference Fortechenvi*. Brno, 26.-30.5.2003., st. 165-174, ISBN 80-7157-665-4.

Naděždina, N. und Koll. (2003): Responses of sap flow in spruce stems and roots to loading by heavy forest machinery. *Sborník referátů z II. mezinárodní vědecké konference Fortechenvi*. Brno, 26.-30.5.2003., st. 523-532, ISBN 80-7157-665-4.

Neruda, J. (a) (2000): Ergebnisse der Schadenserfassung am Boden in Fichtenbeständen beim Einsatz der Erntemaschinen in Durchforstung. *Mezinárodní konference II. Zusammenkunft der Sektion Forsttechnik des Verbandes Deutscher Forstlicher Versuchsanstalten*, Freising, 2000, s. 63-66 (100%).

Neruda, J. (b) (2000): Theorie und Application der Methode zur Auswertung der Forstbestandeschäden nach der Holznutzung. *Proceedings of the International Scientific Conference Forest and Wood Technology vs. Environment- FORTECHENVI 2000*, Brno, 2000, pp. 255-260. (ISBN 80-7157-471-6).

Neruda, J. (2002): Vliv pojezdu standardních a nízkotlakých pneumatik na půdu. *Sborník z mezinárodní vědecké konference Logistika technické výroby dřeva v Karpatoch*, Zvolen, s. 168-175. (Einfluss des Befahrens von Standard- und Niederdruckreifen auf den Boden.)

Neruda, J. und Koll.(2003): Effects of pressure exposure on soil and roots of trees caused by the passage of forest machines. *Sborník referátů z II. mezinárodní vědecké konference Fortechenvi*. Brno, 26.-30.5.2003., st. 449-458, ISBN 80-7157-665-4.

Ulrich, R. und Neruda, J. und Staněk, Z. (2004): Methode zur Oberflächenmessung der Absorptionszonen des Fichtenwurzelsystems. 37. Internationales Symposium Mechanisierung der Waldarbeit – FORMEC 2004, Gmunden, 8 S.

*Die Autoren bedanken sich dem GAČR für Unterstützung bei Lösung der gegebenen Problemstellung sowie dieses Beitrags, ausgedrückt durch Zuteilung des Grantprojekts Nr. 526/02/0792 "Methoden zur Verbesserung der Determination der Wurzelschädigung der Bäume in den Fichtenbeständen von Forwardern".*