

METHODE ZUR OBERFLÄCHENMESSUNG DER ABSORPTIONSZONEN DES FICHTENWURZELSYSTEMS

Radomir Ulrich, Jindrich Neruda und Zdenek Stanek

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

Schlüsselwörter: Baumwurzelsystem, Fichte, Absorptionszonen, Methode zur Oberflächenmessung

Abstrakt: Methode zur Messung der Oberflächen von Absorptionszonen des Baumwurzelsystems wird auf einer experimentell glaubwürdigen Realität gegründet, d.h. elektrischer Strom steigt aus den Wurzeln in den Boden und umgekehrt ein, u.z. überwiegend über denselben Weg wie das Wasser aus dem Boden in die Bäume transportiert wird. Die Kontaktoberfläche – ein Teil der Wurzelenden – wurde als Absorptionszone bezeichnet. Der eingeführte Transport des elektrischen Stromes wird nur dann möglich, wenn Baum und Boden einen Teil des elektrischen Testkreislaufes bilden. Der Transport des elektrischen Stromes erfolgt völlig nur in jenem Fall, wenn die betreffenden Wurzeln gesund und unbeschädigt sind. Bestandteil der Methode ist Formelkonstruktion zur Berechnung der Grösse der betreffenden Absorptionszone. Die Formel umfasst: elektrische Widerstandsfähigkeit der Leitgewebe, Strom der durch Stamm, Wurzelsystem und Boden zur Messelektrode strömt etc. Verifiziert wurden zwei Varianten dieser Methode, u. z. die Messung in Segmenten und die in Winkelzonen. Die Methode kann zum Testen der Folgen bei Schwermaschinenverkehr über Baumwurzelsysteme herangezogen werden.

Es ist ziemlich schwierig, zwischen der Oberfläche der aus Sicht deren Wasserabsorptionsfunktion wichtigen Feinwurzeln (einschl. Mycorrhiza) und der Oberfläche der Grobwurzeln, in denen Wasser bereits absorbiert ist, zu unterscheiden. Die Grobwurzeln können mittels Bodenradargeräte sichtbar gemacht werden (Hruška et al. 1999), aber schwierig ist, eine Quantifizierung in Bezug auf die Wurzeloberfläche durchzuführen. Die feineren Wurzeln können mittels Luftstrahlens (Rizzo u. Gross 2000) sichtbar gemacht werden, aber Problem der Quantifizierung der Oberfläche bleibt weiterhin gleich.

Eine weiter beschriebene Methode (Aubrecht et al. – vorbereitete Publikation in Tree Physiology, Staněk 1998) ist gegründet auf der experimentell verifizierbaren Realität, die darin liegt, dass der elektrische Strom aus den Wurzeln in den Boden (und umgekehrt) eintritt, und zwar überwiegend über dieselben Wege (durch gleiche Kontaktfläche), mit denen das Wasser aus dem Boden in den Baum transportiert wird. Die Kontaktfläche, die nach einigen Vorstellungen einen Teil der Wurzelenden bildet und nach anderen als die zum Pilzflechtgewebe angehörend angesehen ist, wurde als Absorptionszone bezeichnet. Die angeführte Übertragung des elektrischen Stromes erfolgt nur dann, wenn Baum und Boden, in dem er wächst, Bestandteil eines aus der diskreten Quelle gespeisten elektrischen Kreises sind.

Basis der angeführten Methode ist die von den obenangeführten Tatsachen ausgehende Theorie. Diese ist ausführlich in der Publikation bearbeitet. Ergebnis ist folgende einfache Formel zur Berechnung der gesuchten Fläche

$$S = \rho L \frac{I}{U} [m^2, m, \Omega m, A, V] \quad (1)$$

Die enthält die elektrische Wasserwiderstandsfähigkeit der Leitgewebe, die mittels separater Messung zu ermitteln ist, den aus Aussenquelle durch den Stamm der zu messenden Baumart (in dem er mittels Metallspitzensatzes eingeführt ist), durch das Wurzelsystem und durch den Boden zur Metallhilfselektrode oder Elektrodengruppe fließende Strom. Des weiteren beinhaltet die Formel den Unterschied der elektrischen Potentiale zwischen dem Ort, der sich am Scheidenpunkt Boden – Stamm befindet, und der potentialen Elektrode. Die letztere liegt im definierten Abstand ab Stamm und die Länge dieses Abstandes ist ebenfalls in der Formel umfasst. Die Abstände der Hilfsstrom- und der Potentialelektrode ab Stamm des zu messenden Baumes sind nicht willkürlich. Sie gehen vom Ablauf der Potentialcharakteristik aus, was die Abhängigkeit des

Potentials des elektrischen Stromfeldes vom Abstand ab Stamm darstellt, gemessen auf der Bodenoberfläche. Diese Charakteristik ist entweder als ganze zu vermessen oder ihren bestimmten Teil. In einigen Fällen ist die Messung sogar in mehreren Radialrichtungen ab Stamm (asymmetrische Kronen) durchzuführen. Ausnahmsweise kann die Elektrodenlage mittels Abschätzung laut Erfahrung mit anderen Baumarten festgelegt werden. Die Potentialcharakteristik besteht aus dem Paar ungleicher unlinearer (hyperbolischer) Abschnitten (am Stamm und an der Hilfsstromelektrode) und aus dem Linearabschnitt mit sehr geringer Steilheit, der die beiden unlinearen Abschnitte verbindet. Dieser wird als Plateau bezeichnet. In den Boden am Scheidepunkt des Plateaus und des dem Stamm angehörigen hyperbolischen Abschnitts wird die Potentialelektrode eingeschlagen.

Das ideale Verfahren bei Messung, die einen Durchfluss des Meßstromes durch die Gesamtfläche der Absorptionszone der Wurzeln sichert, bedürfte einer Hilfsstromelektrode in Form eines Ringes oder mindestens mancher rund den Baum angeordneten Stäbe. Dies ist technisch unmöglich und kostspielig. Eine reale Anordnung unter Verwendung von beschränkter Zahl an Stabstromelektroden ist durch Verhalten des elektrischen Stromfeldes im Boden limitiert. Das bedeutet, dass der Strom nur durch die Wurzelenden (Absorptionszonen) geleitet wird, die zur am nächsten stehenden Elektrode (Stabgruppe) gerichtet sind.

Bei dieser Lage wurden bis jetzt bei Messung **zwei Verfahren verwendet**: Falls die zu messende Baumart vom Stamm in den Boden radial ausgehende sichtbare Hauptwurzeln mehr oder weniger im regelmässigen Abstand besitzt, kann ein **Segmentverfahren** verwendet werden. Dieses liegt in der Messung der Absorptionsfläche, die den einzelnen Hauptwurzeln entspricht. Dabei wird die Hilfsstromelektrode (Stabgruppe) stufenweise in die radialen den Hauptwurzeln entsprechenden Richtungen umgestellt. Die Gesamtfläche der Absorptionszone des Baumes stellt eine einfache Summe der Absorptionszonen von Segmenten dar. Die Pfahlwurzel, deren Vorliegen in der Regel durch die Baumart gegeben ist, kann als Segmentdurchschnitt eingerechnet (oder nicht eingerechnet- siehe zweites Verfahren) werden.

Die Methode zeigt offensichtlich **zwei Mängel**: Sie kann nicht gegenseitige Überdeckung der Teilsegmentstromfelder respektieren und ist nicht imstande, unsichtbare Abweichungen der Hauptwurzeln von Radialrichtung zu berücksichtigen.

Bei Baumarten, deren Stamm in den Boden ohne Andeutung der Richtung und Zahl der Hauptwurzeln übergeht, ist **Methode der Winkelzonen** mehr geeignet (diese darf nicht mit Absorptionszonen verwechselt werden). Sie unterscheidet sich von der Segmentmethode auf den ersten Blick nur gering, aber stellt kleinere Zeitanprüche und berücksichtigt die gegenseitige Segmentüberdeckung. Dies ermöglicht der genau bestimmte Zonenkoeffizient. Zu seiner Bestimmung sind die Verhältnisse im Boden mit Wurzeln zu modellieren. Solche Modellierung wurde bis jetzt in der elektrolytischen Wanne mit beträchtlich vereinfachtem Wurzelmodell durchgeführt. (Elektronische Modellierung könnte weitere Besserung mitbringen). Der Zonenkoeffizient stellt eine dimensionslose Zahl dar und wird durch den vollen Winkel von 360° , geteilt durch die Winkelzone, gegeben. (Es geht um die Plan- und nicht um Raumwinkel.) Mit diesem Koeffizienten wird die Fläche der Absorptionszonen multipliziert, vermessen aufgrund der obengenannten Bedingungen für einzige radiale Elektrodenanordnung (d.h. Stamm, Potentialelektrode und Hilfsstromelektrode). Besser ist es jedoch, einige Zufallradialrichtungen auszuwählen und von diesen Durchschnitt zu nehmen. Die Pfahlwurzel wird mit keiner speziellen Berechnung oder Verfahren berücksichtigt. Sie beteiligt sich nämlich, soweit sie besteht, am Gesamtstrom bei der Elektrodenradialanordnung in jeder Richtung.

Da es sich um die Widerstandsbeständigkeitsmessung handelt, müssen sämtliche Kreiselemente unbedingt jene Forderung erfüllen, dass zu messende Objekt, d.h. Wurzelsystem im Boden, den ausgeprägt größten Widerstand im Kreis darstellt. In Bezug darauf sind Speisequelle, Stabdichte der Stromelektrode im Boden sowie Spitzenhäufigkeit, mit deren Strom in den Stamm eingeführt wird, zu wählen.

Die Messung der Absorptionszonen (nachfolgend nur AZ) an den Wurzelenden der Baumarten wurde auf einigen Lokalitäten **experimentell verwendet** (Vranov 1, 2 und Telč) als eventuelles Mittel zur objektiven Bestimmung der Wurzelbeschädigungsstufe infolge des Befahrens der Schwerforstmaschinen.

Die Potentialcharakteristik des Wurzelsystems eines gegebenen Baumes stellt ihr „elektrisches Bild“ dar. Gemessen wird ausschliesslich auf der Bodenoberfläche. Ihr Ablauf setzt sich aus dem ausgeprägt unlinearen Teil in der Nähe des Baumes und dem Linearteil mit kleinem Richtungskoeffizienten. Scheidepunkt der beiden Teile ist ein Ort, dessen Abstand L ab Stamm (bzw. Stammachse) in der Formel (1) figuriert und gleichzeitig jener Ort ist, wo man die Hilfs- die sog. Potentialelektrode unterbringt, zwischen der und dem Stamm die U -Spannung gemessen wird. Formel (1) besagt, dass die AZ die Linearfunktion des Stromes bzw. die der elektrischen Leitfähigkeit, repräsentiert durch das I/U -Verhältnis, darstellt. Wird diese Tatsache praktisch überprüft, wird ermittelt, dass die reale Abhängigkeit den Charakter einer Potenzkurve besitzt, u. z. mit Formel:

$$y = bx^a \quad \text{resp.} \quad S = \rho L \left(\frac{I}{U} \right)^a \quad (2)$$

mit Exponenten $0 < a < 1$. Das bedeutet praktisch, dass die AZ-Fläche der starken und grossen Bäume, berechnet laut Formel (1), nur als um wenig grösser ist als die AZ-Fläche der Bäume von kleinerem Stammdurchmesser. Ursache hierfür ist die gegenseitige elektrische Beschattung der dicht anliegenden dünnsten Wurzeln. Ihr Einfluss ist bei grossen Bäumen (Stammdurchmesser über 22 cm) mit dem dimensionslosen Koeffizienten $\xi > 1$ zu berücksichtigen, also Formel (1) erhält die folgende Form:

$$S = \rho L \frac{I}{U} \xi \quad (3)$$

Koeffizient ξ , der mit dem wachsenden Stammdurchmesser des zu messenden Baumes wächst, wurde anhand der Modellierung der Bodenwurzeln mittels elektrolytischer Polarwanne bestimmt. Seine schwierige Verwendung liegt darin, dass die gegenseitige elektrische Schattierung der Wurzeln eine rein individuelle Eigenschaft jedes Baumindividuums darstellt und kann vorab nicht vorgesehen oder aufgrund der objektiven Unterlagen abgeschätzt werden. Alldies stellt einen der bedeutsamen objektiven Fehler dieser Methode dar, der mit Grösse des zu messenden Baumes wächst. Um den ungünstigen Effekt unterdrücken zu können, ist statt der AZ-Messung aller Wurzeln eines konkreten Baumes auf einmal durchzuführen, sind nur die Teile seiner Wurzeln oder die sog. Wurzelsegmente zu vermessen. Arbeiten mit ihnen bringt jedoch weiteres Problem mit: Es geht um die gegenseitige Vernetzung der Teil-(Segment)Stromfelder im Boden, was man irgendwie zahlmässig behandeln muss. Das Prinzip mündet in Form des Koeffizienten $\chi < 1$ aus.

Weitere Wirkungen auf die AZ-Grösse wie der obengenannte Transport des Messtromes in den oder aus dem Boden über andere Wege als AZ und mechanische Wurzelschäden aus verschiedensten Ursachen sind, wird wiederum mit dimensionslosen Koeffizienten berücksichtigt. Die ganze Formel zur Berechnung der AZ-Fläche ist wie folgt:

$$S = \rho L \xi \chi \varrho \lambda \frac{I}{U} [m^2, m, \Omega m, V, A] \quad (4)$$

Die AZ-Messung, repräsentiert durch Formeln (1), (3), (4) mittels separater Geräte zur Messung U und I ist praxisbezogen ziemlich kompliziert. Um den Arbeitsaufwand zu reduzieren, zeigte sich als zweckmässig, ein Logometer mit eingebautem Generator des Messtromes zu verwenden. Aus den Marktangeboten wurde Gerät MEGGER von gleichnamiger Firma ausgewählt. Bei seiner Verwendung wird die AZ-Fläche berechnet nach Formel

$$S = \frac{\rho L}{R} [\Omega m, m^2, m, \Omega] \quad (5)$$

wobei R Angabe des MEGGER-Gerätes darstellt. Die Korrektionskoeffizienten bleiben unverändert. Dieses Gerät ist jedoch nicht zur Messung der AZ bei Baumarten konstruiert, sondern nur und ausschliesslich zur Messung auf den technischen Erdungen. Dort gibt es jedoch kein Problem eines Vorliegens des Limitmesstromes (bei MEGGER-Gerät sind dies 10 mA). MEGGERs Limitstrom stellt umgekehrt eine bedeutende Beschränkung bei AZ-Messung der Baumarten dar, die darin liegt, dass man bei Baumarten mit Stammdurchmesser über 22 cm Angaben erhält, die durch den negativen Fehler belastet sind, der bei Stämmen mit Durchmesser von z. B. 60 cm und mehr bis Hunderte % betragen kann. Abhilfe ist wiederum in der Segmentmessung oder dem Übergang auf Messung mit diskreten Geräten mit leistungsfähigerem Generator zu suchen. Wichtige Bedingung ist auch Bestimmung der Optimalzahl der Stromelektroden im Stamm.

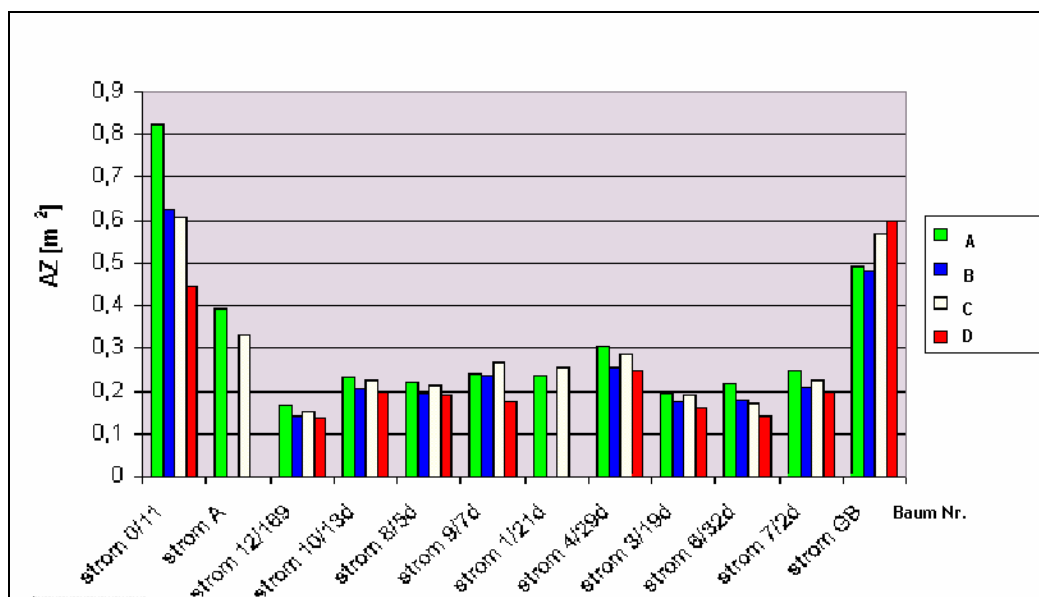
Was man von der AZ-Messung bei Beanspruchung des Bodens mit Wurzeln, unter dem Einfluss des Befahrens mit Forwarder erwarten kann, ergibt sich aus der Linearabhängigkeit der AZ-Fläche von der „Erdleitfähigkeit“ des Wurzelsystems des zu untersuchenden Baumes. Bei flach wurzelnder Fichte wird es sowohl Reduzierung der AZ-Fläche infolge der Beschädigung als auch eine falsche Erhöhung der AZ-Fläche ebenfalls wegen der Beschädigung (z. B. Abschürfung oder Abscherung der Wurzelhaut) und nachfolgender Zusammendrückung oder Andrückung des feuchten Bodens.

Die theoretischen Voraussetzungen wurden praktisch auf den Lokalitäten Vranov 1-2 und Telč überprüft. Die Trajektorie des Forwarders wurde unter den gegenseitig parallelen Baumreihen ausgewählt. Die AZ der Wurzelsegmente wurden durch ihre Achse sowohl in die Trajektorie als auch daraus nach aussen gerichtet, d.h. mit gegenseitiger Achsenverschiebung von 180° . Auf der Lokalität Vranov 1-Ameisennest arbeitete man mit

Segmentwinkel von 60° . Die AZ-Messung wurde aus den organisationstechnischen Gründen nur auf den Stand „nach dem Befahren“ beschränkt und mittels TV-Kamera verfolgt. Hinsichtlich der Baumdimensionen konnte man ohne Korrekturen arbeiten. Die Ergebnisse sind der graphischen Darstellung und Tabelle zu entnehmen. Ersichtlich ist, dass alle vier Bäume in der Trajektorie kleinere AZ haben gegenüber der AZ außerhalb der Trajektorie.

Auf den Lokalitäten Vranov 2 arbeitete man in Segmenten von 180° . Die Messung erfolgte aus technischen Gründen nur „nach den Befahren“. Mit Rücksicht auf die Dimensionsungleichartigkeit der befahrenen Baumarten waren bei einigen Individuen Zahlkorrekturen vorzunehmen und bei anderen war es nicht nötig.

Die wertvollsten Ergebnisse wurden auf der Lokalität Telč gewonnen. Dort wurde mit der dimensionsausgeglichenen Gesamtheit von zwölf Bäumen gearbeitet, bei der Auswertung waren keine Korrekturen notwendig und Formel (5) konnte völlig benutzt werden. Die Wurzelsegmente wurden von 180° gewählt. Die Widerstandsbeständigkeit p in Stämmen wurde konsequent vor und nach dem Befahren gemessen. Ein Beispiel der Ergebnissen gibt es in der Darstellung 1.



Darstellung 1: Ergebnisse der Messung der Absorptionszonen in Telč. Fichtenbestand 45 Jahre alt, Forwarder FMG Mini Brunett 678, 10 Befahrungen. Erklärungen: A... Messung der AZ in der Richtung aus der Gasse – vor der Befahrung, B... Messung der AZ in der Richtung aus der Gasse – nach der Befahrung, C... Messung der AZ in der Richtung in die Gasse – vor der Befahrung, D... Messung der AZ in der Richtung in die Gasse – nach der Befahrung.

Neue Erkenntnisse von grundsätzlicher Bedeutung

1. Die Beschädigung, d.h. Reduzierung der AZ-Fläche nach dem Befahren, zeigt sich nicht nur bei Wurzeln auf der befahrenen Fläche, sondern z.T., jedoch konsequent (in Abhängigkeit vom Segmentwinkelausmass) auch ausserhalb der befahrenen Fläche.
2. Die Wurzelschädigung zeigt sich in der Erhöhung der Widerstandsbeständigkeit, soweit sie im zeitlichen Abstand von mehreren Stunden unter Berücksichtigung insbesondere der Temperaturabhängigkeit gemessen wird.
3. Offensichtlich äussert sich auch keine Schädigung, und zwar durch Null- oder schwache Änderung der Widerstandbeständigkeit.

Schlussfolgerungen

Mittels AZ-Messung kann man Wurzelschädigung oder –nichtsichädigung von Baumarten infolge des Befahrens durch Forstmaschinen feststellen. Der Beschädigungsumfang kann quantifiziert werden. Der evidente Nachteil ist ein ziemlich kompliziertes Messverfahren mit mehreren Schritten. Eine weitere Entwicklung und Vereinfachung kann nicht ausgeschlossen werden, jedoch nach der unentbehrlichen Forschung. Bis jetzt ist sie für Kontroll- und Hilfsmethode zu halten, wobei die wertvollsten Ergebnisse bei experimentellem Befahren der Schwermaschinen unter den gegenseitig biometrisch gleichwertigen Bäumen zu erzielen sind.

Ähnliche Ergebnisse wurden von Prof. Kodrík (2002) erreicht. Dabei wurde ermittelt, dass Fichte in der Humusschicht bei höherem Unterwasserspiegel Wurzelteller mit Oberhand von dünnen Saugwurzeln in Tiefe bis zu 20 cm bildet. Bei allen zu messenden Bäumen der Fichte wurde ermittelt, dass Wurzelsystem im Alter zwischen 30 und 40 Jahren nie Breite von 250 cm und Tiefe von 50 cm überschritt. Den aussergewöhnlichen Einfluss auf die Wurzelgestaltung bei Fichte hatte das Unterwasser. Bei seinem hohen Spiegel waren Wurzeln in der Schicht bis auf 20 cm überwiegend dünner als 3 cm. Das Wurzelwachstum verlief höchstens bis zum Alter von 80 Jahren, wobei der Verfaulungsprozess bereits in den 50er Jahren durch *Heterobasidion anosum* (Fr.) BREF. und *Armillaria ostoyae* (ROMAGN.)HERINK sehr intensiv war.

Bei weiterer Forschung der negativen Einflüsse der Nutzungstechnologien scheint es positiv sein, die Messungen der Absorptionszonen des Baumwurzelsystems auszunutzen, Netz der Probeflächen erweitern und an der statistisch ausreichend signifikanten Gesamtheit die Zeit für Wurzelsystemerneuerung festlegen. Die wertvollsten Ergebnisse zur Messung können bei experimentellem Befahren der schweren Holzermaschinen unter den biometrisch gegenseitig gleichwertigen Bäumen erzielt werden.

Literatur:

Kodrík, J. (2002): Untersuchung an Wurzelsystemen der Hauptbaumarten mit Rücksicht auf die statische Windstabilität. Reports of Forestry Research 47, 4/2002, S. 208-213.

Neruda, J. und Kol. (2004): Methoden für Verbesserung der Determinierung der Wurzelbeschädigung der Bäume in Fichtenbeständen durch Forwarders. *Forschungsbericht über Grantprojekt Nr.526/02/0792*, MZLU Brno, 22 S.

Staněk, Z. (1998): Physical aspects of resistance measurement in plants and their ecological applications. Assoc. Prof. Thesis, dept. of Physics, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University in Prague, 166 p.

Staněk, Z. und Koll. (2002): Methode der elektrischen Messungen an Wurzeln der Baumarten. Interne Publikation des Lehrstuhls für Physik, ČVUT FEL Praha.

Ulrich, R. und Koll. (2003): Einfluss der Breite der Rückegassen auf den Baumzuwachs und die Beschädigung des Wurzelsystems bei Ermittlung der Schäden in Durchforstungsfichtenbeständen nach den Harvestern und Forwardern. Forschung für CZ-Landwirtschaftsministerium, Forstfakultät der MZLU Brno, 68 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".