

Randeffekte bei der Elektrischen-Widerstands-Tomografie (EWT) an Bäumen

Boundary effects of the Electrical Resistivity Tomography (ERT) on tree trunks

von *Ulrich Weihs, Falko Kubnke, Mitja Vianden und Alexander Emming*

Zusammenfassung

Aus der Literatur (z. B. WEIDELT & WELLER 1997) ist bekannt, dass es bei elektrischen Widerstandsmessungen an zylindrischen Körpern zu Verfälschungen der Messergebnisse kommt, sobald die Messebene zu nah an das Ende eines nur idealerweise unendlichen Probekörpers rückt. Nach WEIDELT & WELLER (1997) ist dieser Randeffekt klein, sofern $L/a \gg 1$ gilt, d. h. der Messabstand L vom Rand des Zylinders (z. B. Baumstamm) deutlich größer als sein Radius a ist. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, den Messfehler in Abhängigkeit der Größe L/a experimentell zu bestimmen und mit den vorliegenden theoretischen Ergebnissen zu vergleichen. Zugleich wird der Frage nachgegangen, wie die Messungen im Fall der Annäherung der Messebene an den bodennahen Wurzelanlauf des Baumstammes beeinflusst werden. Hier liegt im Gegensatz zum erstgenannten, hochohmigen Fall, quasi ein Kurzschluss durch die Verbindung der Baumwurzeln mit dem Erdreich vor.

Die im Praxisversuch erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Messfehler durch Randeffekte kleiner als zehn Prozent sind, sofern für die Messebene ein Abstand L vom Rand (z. B. Wurzelanlauf), bezogen auf den Baumradius a , von $L/a \geq 5$ eingehalten wird.

Summary

Scientific papers (e. g. WEIDELT & WELLER 1997) show that the results of ERT-measurements are corrupted if the measurement level is located near the end of an ideally infinite sample item. According to WEIDELT & WELLER (1997) this boundary effect is small if $L/a \gg 1$ is true. This means that the distance L between the measurement level and the end of the cylinder (e. g. the trunk) must clearly exceed its radius a . The intention of the presented study is to determine experimentally the measurement error as a function of the ratio L/a and to compare the results with the existing theoretical conclusions. Furthermore, it was analysed how the results are affected if the measurement level is approximated to the collar near the ground. In contrast to the first mentioned high resistance case, in this situation a quasi short circuit exists through the connection of the roots with the underground. The results of the field study show that the measurement error caused by the boundary effects is smaller than 10 percent, if a distance L between the measurement level and the end of the cylinder (e. g. the collar), in relation to the tree radius of $L/a \geq 5$, is observed.

1 Einleitung und Fragestellung

Bei der EWT handelt es sich um ein minimalinvasives Tomografieverfahren der eingehenden Baumuntersuchung. Im forstlichen Bereich werden mit diesem Verfahren seit vielen Jahren Fäulen sowie fakultative

Farbkern an wichtigen Wirtschaftsbaumarten diagnostiziert (WEIHS et al. 1999; HANSKÖTTER 2004; FITZNER & SCHILLING 2005; BIEKER et al. 2011; WEIHS & JASCHINSKI 2012). Im urbanen Bereich wird die EWT wie die Schalltomografie erfolgreich zur Beurteilung der Bruchfestigkeit von Bäumen eingesetzt. Im Rahmen

aktueller Untersuchungen von Stockfäule an 26 Robinien (*Robinia pseudoacacia* 'Monophylla') zeigte sich, dass die im unteren Stammbereich der Bäume gemessenen elektrischen Widerstände stets geringer waren als in höheren Stammbereichen (WEIHS & JASCHINSKI 2012). Nach der Fällung von vier Gefahrenbäumen wurde die diagnostizierte Stockfäule zwar bestätigt, es stellte sich jedoch die grundsätzliche Frage, welchen Einfluss neben der beobachteten Fäule die im bodennahen Wurzelanlaufbereich des Stammzylinders veränderten Randbedingungen durch die Ankopplung über seine Wurzeln an den Erdboden auf das Messergebnis ausüben.

Zielsetzung der vorliegenden Untersuchung war es, dieser Fragestellung im Rahmen eines Praxisversuches nachzugehen, um die Diagnosesicherheit von EWT-Messungen im Wurzelanlaufbereich von Bäumen zu verbessern. Hierzu wurden im Frühjahr 2012 vier Stämme junger Rot-Buchen (*Fagus sylvatica* L.) eines Waldbestandes im Niedersächsischen Forstamt Reinhausen in sieben Messebenen ausgehend vom Wurzelanlauf bis in einen Meter Stammhöhe mittels EWT zunächst stehend und nachfolgend im abgesägten Zustand untersucht.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsdurchführung

Bei den vier Versuchsbäumen handelte es sich um zwischenständige, ca. 60-jährige Rot-Buchen eines Waldbestandes auf Buntsandstein mit Lössüberlagerung im Niedersächsischen Forstamt Reinhausen in der Nähe von Göttingen. Die Höhe der Bäume betrug ca. 20 m. Der Brusthöhendurchmesser variierte in engen Grenzen um 20 cm. Es wurden gezielt Rot-Buchen mit schwach ausgebildeten Wurzelanläufen ausgewählt, deren unterer Stammbereich bis in die Höhe von einem Meter möglichst rund, gerade und frei von Schäden war. Die Untersuchung fand im Zeitraum vom 06. bis 15. März 2012 in unbelaubtem Zustand statt. Die Tagestemperaturen zeigten bei überwiegend diffusen Strahlungsverhältnissen nur geringe Schwankungen im Bereich von 5 bis 10 °C. Die Messungen wurden mit dem 4-kanaligen Widerstandstomografen Geotom (Geolog2000 – Fuß und Hepp GbR, Augsburg) mit 24

Stichelektroden im unteren Stammbereich eines jeden Baumes in sieben Höhenstufen von 5, 15, 30, 50, 70, 85 und 95 Zentimetern über Bodenniveau durchgeführt. Der Winkel zwischen den gleichmäßig auf dem Stammumfang verteilten Elektroden betrug 15°.

Die 24 Einstichstellen der Elektroden wurden in jeder Messebene zum Wiederauffinden für die Wiederholungsmessungen am abgetrennten Stammzylinder mit farbigen Nadeln markiert. Nach Abschluss der Messungen am stehenden Stamm wurde dieser von der Krone her per Motorsäge abgesetzt und in einem Meter Höhe sowie bodentief waagrecht sauber abgetrennt. Daran anschließend wurden die Messungen in derselben Konfiguration am abgetrennten Stammzylinder wiederholt. Entsprechend den axialsymmetrisch gewählten Messebenen betrug die Abstände zum oberen und unteren Rand des einen Meter langen Stammzylinders 5 cm (Messebene in 5 und 95 cm Höhe), 15 cm (Messebene in 15 und 85 cm Höhe), 30 cm (Messebene in 30 und 70 cm Höhe) und 50 cm (mittlere Messebene in 50 cm Höhe). Zur Vermeidung einer Ankopplung an den möglicherweise gut leitenden, feuchten Erdboden wurde der abgetrennte Stammzylinder auf eine elektrisch isolierende Gummimatte gestellt. Die Stammgeometrie in den Messebenen wurde im Nachhinein anhand von Fotos der im Labor herausgesägten Stammscheiben vermessen und bei der Berechnung der spezifischen elektrischen Widerstände berücksichtigt.

Der Jahreszeit entsprechend (hoher Wassergehalt des Stammholzes kurz vor Beginn des Laubaustriebes (WAGNER 2000) trat nach dem Abtrennen bei allen Stammzylindern aus den bodentiefen Schnittflächen Wasser aus. Da der elektrische Widerstand des Holzes primär von seiner Feuchte beeinflusst wird, dürfte dieser Umstand zu leichten Verfälschungen der Messergebnisse geführt haben, die bei zukünftigen Versuchen durch methodische Verbesserungen minimiert werden.

2.2 Auswertung

Die bei Annäherung der Messebene an die Enden der Stammzylinder der vier untersuchten Rotbuchen im Praxisversuch festgestellten relativen Messfehler wurden mit den von WEIDELT & WELLER (1997) hergelei-

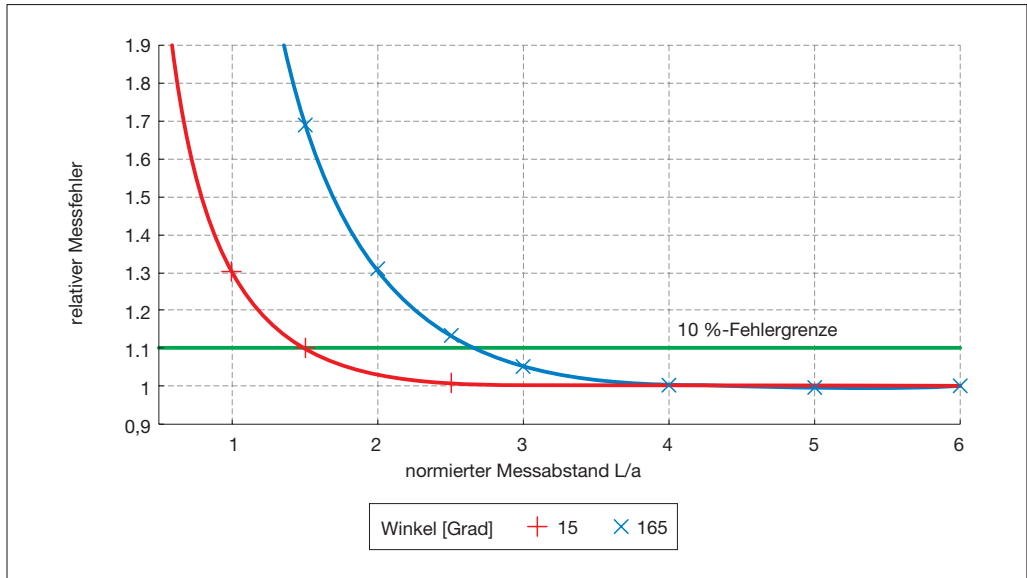


Abbildung 1: Extrahierte und normierte Daten der von WEIDELT & WELLER (1997) tabellarisch dargestellten theoretischen Messfehler

teten theoretischen Messfehlern (Abbildung 1) verglichen. Entsprechend der im Praxisversuch gewählten symmetrisch azimuthalen Messkonfiguration mit 24 Elektroden in einem Winkelabstand von 15° wurden aus der Tabelle 1 von WEIDELT und WELLER (1997) die korrespondierenden Daten für den minimalen Messwinkel von 15° und den maximalen Messwinkel von 165° extrahiert und auf das L/a-Verhältnis 6 normiert (Abbildung 1).

Es wird deutlich, dass mit zunehmender Verringerung des Messabstandes an das „offene Zylinderende“ (abnehmendes L/a-Verhältnis) der relative Messfehler exponentiell ansteigt. Ebenso ist ein Anstieg des Messfehlers mit zunehmendem Messwinkel (Winkelabstand zwischen einspeisenden und abgreifenden Elektroden) zu beobachten. Periphere EWT-Messungen mit kleinerem Messwinkel sind also weniger fehlerbehaftet als tiefer in den Zylinder eindringende Messungen mit größerem Messwinkel. Während der theoretische Messfehler bei einem Messabstand vom „offenen Zylinderende“ von mehr als dem 3-fachen des Zylinder-radius deutlich unter 10 % liegt, überschreitet er bei einem L/a-Verhältnis von ca. 2,5 die 10 %-Marke, um danach überproportional anzusteigen.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Einfluss des Wurzelbereiches auf die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes von Bäumen

Bei den stehenden Rotbuchen zeigten die mittleren elektrischen Widerstände der Messebenen eine Abnahme mit zunehmender Annäherung an den Wurzelanlauf (Tabelle 1).

Im Vergleich aller sieben Messebenen fällt insbesondere der mit 1353 Ω niedrigste Mittelwert des elektrischen Widerstandes in der bodennahen Messebene von 5 cm auf, die nur ca. 50 % des Widerstandsniveaus der drei oberen Messebenen erreicht und sich nicht auf einen adäquaten Anstieg der Darrbezugsfeuchte (DBF) zurückführen lässt. Die Mittelwerte der DBF liegen – abgesehen von der obersten Messebene in 95 cm Höhe, die mit 71 % den signifikant geringsten Wert aufweist – in allen anderen Messebenen in einem engen Bereich von 76 bis 78 %.

Tabelle 1: Mittelwerte der elektrischen Widerstände [Ω] und der Darrbezugsfeuchte [%] der stehenden vier Rot-Buchen nach Messhöhe

Messhöhe [cm]	Rot-Buchen Nr. [Ω]					DBF [%] \bar{x}	VK* [%]
	1	2	3	4	insg.:		
5	1733	1588	915	1176	1353 D	78 A	11
15	2432	1987	1109	1562	1773 C	77 A	12
30	2948	2422	1389	1959	2179 B	77 A	13
50	3410	2669	1625	2185	2472 A	77 A	14
70	3327	2599	1750	2255	2483 A	77 A	14
85	3373	2728	1792	2171	2513 A	76 A	14
95	3371	2709	1798	2174	2516 A	71 B	12
insges.:	2942	2386	1483	1926	2184	76	13

Mittelwerte mit unterschiedlichen Großbuchstaben unterscheiden sich signifikant ($\alpha = 0,05$)

* Variationskoeffizient

Im Gegensatz zu den von WEIDELT & WELLER (1997) als Funktion des Messortes L/a berechneten relativen Fehlern des spezifischen Widerstandes (Abbildung 1) zeigen die in Abbildung 2 dargestellten Fehlerfunktionen der vier untersuchten, stehenden Rotbuchen keinen ansteigenden, sondern einen abfallenden Kurvenverlauf. Diese Tatsache belegt, dass es im Gegensatz zu der Annäherung der Messebene an ein tatsächlich „offenes Zylinderende“ bei EWT-Messungen im Wurzelanlaufbereich nicht zu einem fehlerbedingten Anstieg des spezifischen Widerstandes, sondern zu einem Abfall in den niederohmigen Bereich kommt. Bei Messungen im bodennahen Bereich des Wurzelanlaufes liegt quasi ein Kurzschluss durch die Verbindung der Baumwurzeln mit dem Erdreich vor. Im Vergleich zu den Rot-Buchen 1, 2 und 4, bei denen der relative Messfehler erst bei einem Unterschreiten des L/a Verhältnisses von ca. 3 die Größenordnung von 10 % übersteigt, ist dies bei Rot-Buche 3 bereits ab einem L/a Verhältnis von 5 der Fall.

Am Beispiel der Rot-Buche 3 wird deutlich, dass, wie bei der theoretischen Herleitung von WEIDELT & WELLER (1997), auch im Praxisversuch ein Anstieg des relativen Messfehlers mit zunehmendem Messwinkel auftritt (Abbildung 3). Bei den im vorliegenden Versuch mit 24 Elektroden in einem Winkelabstand von 15° durchgeführten EWT-Messungen, wird die Spannwei-

te der zu verzeichnenden relativen Messfehler durch die Messwinkel von 15° (Minimum) und 165° (Maximum) eingegrenzt.

3.2 Einfluss des „offenen Endes“ des abgetrennten Stammzylinders auf die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes

In der folgenden Abbildung 4 ist der Einfluss des „offenen Endes“ am abgetrennten Stammzylinder auf die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes an den vier untersuchten Rotbuchen dargestellt. Die Fehlerfunktionen der mit einem Stern gekennzeichneten Rot-Buchen (unterbrochener Linienverlauf) beziehen sich jeweils auf die obere Schnittfläche des abgetrennten Stammzylinders, die durchgezogenen Kurvenverläufe auf die untere Schnittfläche im Stammfußbereich.

Im Gegensatz zu den im Stammfußbereich der stehenden Rot-Buchen zu beobachtenden, fehlerbedingten Abfall des spezifischen Widerstandes (Abbildung 2 und 3), kommt es bei der Annäherung der Messebene an das „offene Ende“ des Stammzylinders, wie von WEIDELT & WELLER (1997) in ihrer theoretischen Herleitung beschrieben, zu einem fehlerbedingten An-

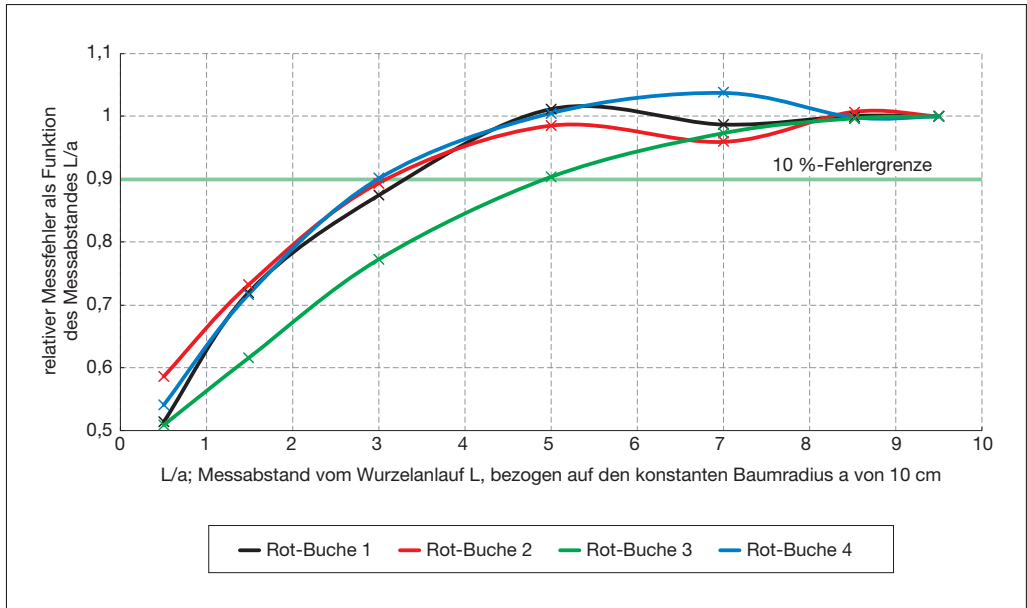


Abbildung 2: Einfluss des Wurzelbereiches auf die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes von Rot-Buchen

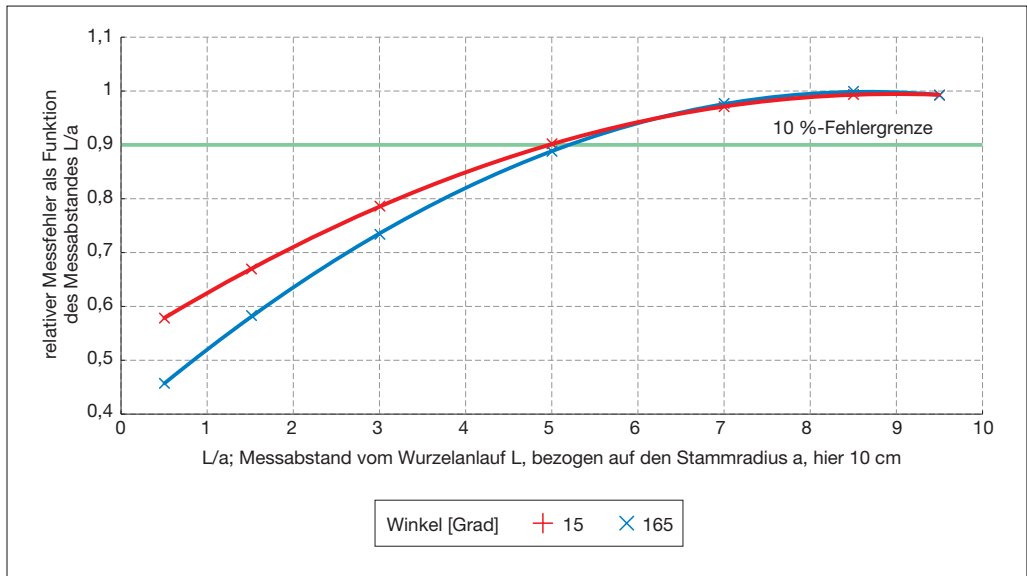


Abbildung 3: Normierte elektrische Widerstände des minimalen und maximalen Messwinkels an Rot-Buche 3, stehend

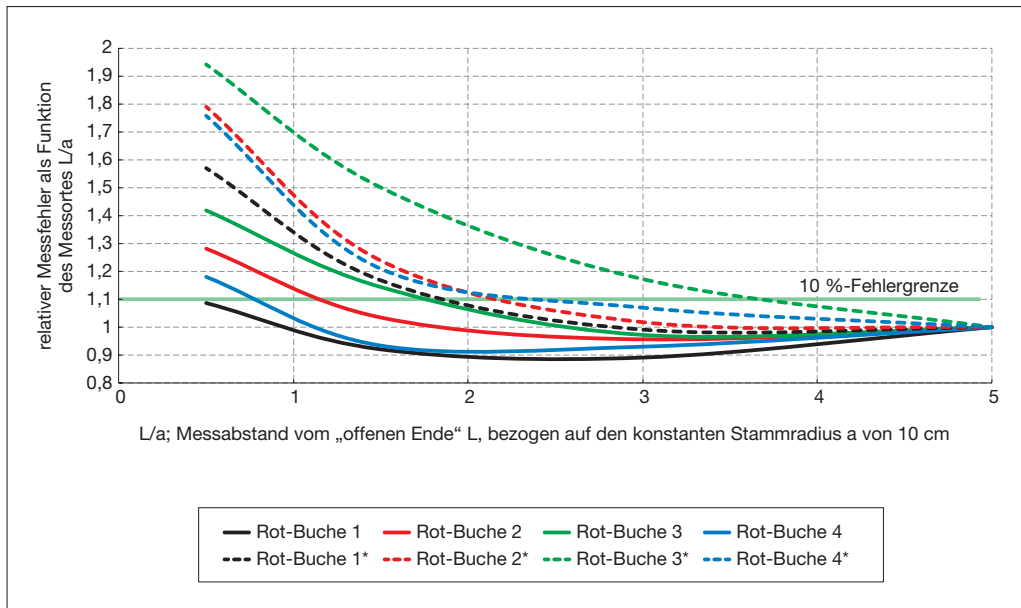


Abbildung 4: Einfluss des ‚offenen Endes‘ des abgetrennten Stammzylinders auf die Messung des spezifischen elektrischen Widerstandes

stieg des spezifischen elektrischen Widerstandes. Die zwischen den Fehlerfunktionen der vier Rot-Buchen zu verzeichnende Variation ist darauf zurückzuführen, dass es sich bei Bäumen um anisotrope, komplex strukturierte Organismen und nicht um homogene elektrische Leiter handelt. Die Tatsache, dass bei allen vier Rot-Buchen der relative Messfehler in Richtung des oberen Zylinderendes (Kurvenverläufe mit unterbrochenen Linien) über demjenigen in Richtung des unteren Zylinderendes liegt, dürfte auf den methodischen Fehler zurückzuführen sein, dass die abgetrennten Stammzylinder im stehenden und nicht im liegenden Zustand tomografiert wurden. Da die Messungen kurz vor Laubaustrieb zum Zeitpunkt des maximalen Wassergehaltes der Rot-Buchenstämme (WAGNER 2000) durchgeführt wurde, dürfte sich ein schwerkraftbedingter, positiver Feuchtigkeitsgradient durch das Absacken des in den Gefäßen befindlichen freien Wassers in Richtung der unteren Schnittfläche ausgebildet haben.

4 Folgerungen

Die von (WEIDELT & WELLER 1997) im Rahmen der Elektrischen-Widerstands-Tomografie (EWT) bei Annäherung der Messebene an das „offene Ende“ von zylindrischen Körpern beschriebenen Messfehler wurden im Rahmen des vorliegenden Praxisversuches mit vier Rot-Buchen (*Fagus sylvatica* L.) experimentell bestätigt. Es konnte gezeigt werden, dass ähnliche Messfehler auch bei EWT-Messungen an stehenden Bäumen mit zunehmender Annäherung der Messebene an den bodennahen Wurzelanlauf des Baumes auftreten.

Im Gegensatz zu dem von WEIDELT & WELLER (1997) dargestellten „hochohmigen“ Fall eines Zylinders mit „offenen Enden“ ist der stehende Baum über seine Wurzeln mit dem Erdreich verbunden. Diese „Ankopplung“ führt bei EWT-Messungen im Wurzelanlaufbereich von Bäumen quasi zu einem Kurzschluss. Entsprechend weisen die ermittelten Funktionen des relativen Messfehlers bei Annäherung der Messebene an den Wurzelanlauf keinen Anstieg, sondern einen

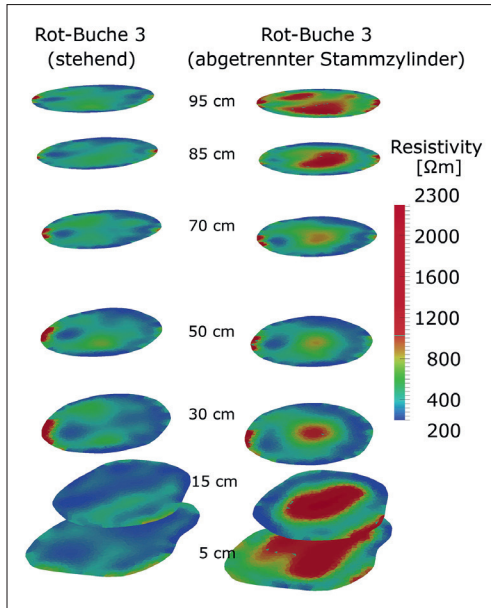


Abbildung 5: Vergleichende Darstellung der elektrischen Widerstandstomogramme der Rot-Buche 3 (links stehend; rechts abgetrennter Stammzylinder)

Abfall in den niederohmigen Bereich auf (siehe Abbildung 2 und 3), der sich auch in den elektrischen Widerstandstomogrammen der stehenden Rot-Buche 3 in den Messebenen von 5 bis 95 cm Höhe widerspiegelt (Abbildung 5 stehend (links) im Vergleich zum abgetrennten Stammzylinder (rechts)).

Im vorliegenden Praxisversuch waren die Messfehler durch Randeffekte kleiner als zehn Prozent, sofern für die Messebene ein Abstand L vom Wurzelanlauf bezogen auf den Baumradius a von $L/a \geq 3$ (bei Rot-Buche 3 ≥ 5) eingehalten wurde. Das Wissen um die Größe und die Richtung des im Wurzelanlaufbereich

von Bäumen auftretenden Messfehlers der EWT ist bei der Diagnose von Stock- und/oder Wurzelfäule hilfreich, indem eine im Rahmen der Fehlertoleranz liegende Niederohmigkeit in diesem Bereich nicht überinterpretiert wird, ein darüber hinausgehendes Absinken des spezifischen elektrischen Widerstandes aber für das Vorliegen einer Stockfäule spricht. In berechtigten Einzelfällen, wie z. B. bei wertvollen, alten Bäumen, sollten zur Abschätzung des Messfehlers neben der Messung im bodennahen Stammfußbereich daher zwei weitere Referenzmessungen am stehenden Stamm in den Messhöhen $L/a \geq 5$ sowie $L/a \sim 2,5$ durchgeführt werden.

Literatur

- BIEKER, D.; RUST, S.; WEBER, G.; KEHR, R., 2011: Zerstörungsfreies Monitoring von Pilzwachstum im Frühstadium. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Haymarket Media, Braunschweig, 267–272.
- FITZNER, S.; SCHILLING, M., 2005: Der Eschenbraunkern und seine Diagnose mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“. Diplomarbeit im Studiengang Forstwirtschaft, HAWK (Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim/Holzminnen/Göttingen), 80 S. unveröffentl.
- HANSKÖTTER, B., 2004: Diagnose fakultativer Farbkerne an stehender Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“. Dissertation Georg-August-Universität Göttingen – Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen, 133 S.
- WAGNER, J., 2000: Feuchte im stehenden Laub- und Nadelholz, eine Literaturrecherche. Diplomarbeit, Göttingen, HAWK-Fakultät Ressourcenmanagement, unveröffentlicht.
- WEIDELT, P.; WELLER, A., 1997: Computation of geoelectrical configuration factors for cylindrical core samples. Scientific Drilling 6, 27–34
- WEIHS, U.; DUBBEL, V.; KRUMMEHEUER, F.; JUST, A., 1999: Die elektrische Widerstandstomographie – Ein viel versprechendes Verfahren zur Farbkerndiagnose am stehenden Rotbuchenstamm. Forst und Holz 54, 166–169.
- WEIHS, U.; JASCHINSKI, T., 2012: Verifizierung unterschiedlicher Methoden zur eingehenden Untersuchung von Stockfäule an Straßenaakazie *Robinea pseudoacacia* 'Monophylla'. In: DUJESIEFKEN, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege. Haymarket Media, Braunschweig, 302–310.

Autoren

Prof. Dr. Ulrich Weibs ist Professor für Baumsachverständigenwesen, Verkehrssicherheit für Bäume und Baumwertermittlung an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) in Göttingen sowie von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Baumpflege, Verkehrssicherheit von Bäumen und Baumwertermittlung.



Dr. Falko Kunke ist Dipl.-Physiker und Koordinator des an der HAWK-Fakultät Ressourcenmanagement implementierten Forschungsschwerpunktes „Städtischer Wurzelraum“.

Dipl.-Geograph Mitja Vianden ist wissenschaftliche Mitarbeiter in Göttingen.



BSc Arboristik Alexander Emming studierte an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) Arboristik und schrieb über das vorliegende Thema seine Bachelorarbeit.

*Hochschule für Angewandte Wissenschaft
und Kunst (HAWK)
Fakultät Ressourcenmanagement
Büsgenweg 1a, 37077 Göttingen
Tel. (01 62) 6 17 30 38
weibs@hawk-bbg.de*