

Zerstörungsfreie Baumdiagnose mittels elektrischer Widerstandstomographie

Von Prof. Dr. Ulrich Weihs und Dr. Friedemann Krummheuer, HAWK Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst
Fachhochschule Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement, Büsingenweg 1a, 37077 Göttingen

1 Einleitung

Im Jahre 1999 wurde an der Fakultät Ressourcenmanagement in Göttingen die Projektgruppe „Non Destructive Testing of Trees“ ins Leben gerufen. Seitdem wurde im Rahmen einer ganzen Reihe von Drittmittelprojekten das ursprünglich aus der Geophysik stammende Verfahren der „Elektrischen Widerstandstomographie“ erfolgreich auf den Bereich der „zerstörungsfreien Baumdiagnose“ übertragen [11, 12, 13, 14].

2 Messmethodik

Das Prinzip der „Elektrischen Widerstandstomographie“ beruht auf der Messung von elektrischen Potentialdifferenzen (Spannungen), die ein über Stichelektroden in den stehenden Stamm eingespeister Wechselstrom verursacht. Die Stromeinspeisung und der Spannungsabgriff erfolgen dabei nur an der Stammoberfläche des zu untersuchenden Baumes. Anhand der dort gemessenen Spannungswerte kann auf die elektrische Leitfähigkeitsverteilung im Innern des Stammes geschlossen werden, durch deren charakteristische Kontraste eine Diagnose holzphysiologischer Veränderungen wie Farbkerne oder Fäule ermöglicht wird.

In der praktischen Anwendung des Verfahrens an stehenden Bäumen hat sich eine axialsymmetrische Anordnung bewährt, bei der über eine freie Verkabelung oder über einen Konfigurationsring 24 Elektroden in der gewünschten Querschnittsebene äquidistant auf dem Baumumfang verteilt werden (s. Abb. 1). Je zwei Elektroden dienen jeweils zur Stromeinspeisung und zwei andere für den Spannungsabgriff. Für die Ankopplung der Elektroden an den Baum ist in der Regel ein vorsichtiges Eindrücken der Nadelspitzen in das Kambium des Baumes ausreichend.

Nach dem Start des durch einen PC gesteuerten Messablaufprogrammes werden alle realisierbaren Konfigurationen durch einen Multiplexer erfasst. Bei 24 Elektroden, die in der sog. Dipol-Dipol-Anordnung [6] geschaltet werden, sind insgesamt 504 Messwerte zu verzeichnen. Diese werden von dem PC als ASCII-Datei gespeichert und im Rahmen eines mathematischen Rekonstruktionsalgorithmus ausgewertet. Als Endergebnis liegt ein zweidimensionales Farbtomogramm vor, das eine Ansprache der widerstandsrelevanten holzanatomischen Veränderungen (Fäule und andere Defekte) über den gesamten Stammquerschnitt der Messebene gestattet.

Neben der in den letzten Jahren angewandten Inversionssoftware „ELTKRN“ von JUST und DANCKWARDT [4] steht zur zweidimensionalen graphischen Darstellung der Lage und Größe widerstandsrelevanter holzphysiologischer Veränderungen im Stammquerschnitt seit 2005 mit

dem Programm „DC2dTree“ von RÜCKER und GÜNTHER [7] eine Visualisierungssoftware zur Verfügung, die die tatsächliche Querschnittsgeometrie des untersuchten Baumes berücksichtigt. Dadurch ist es möglich, Defekte im Stamm hinsichtlich ihrer Lage und Größe wesentlich genauer als bisher zu lokalisieren.

Zerstörungsfreie Baumdiagnose mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“

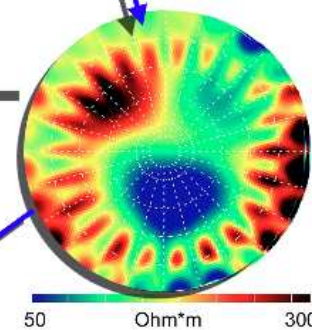
Funktionsweise



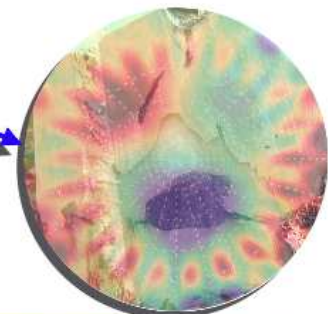
Stromeinspeisung und Erfassung der Potentialdifferenzen über 24 äquidistant auf dem Baumumfang verteilte Nadelelektroden durch einen Differenzverstärker. Einfache und durchmesserunabhängige Ankopplung der Elektroden an die Baumoberfläche durch einen Konfigurationsring



Iterative Berechnung der Widerstandsverteilung im Stammquerschnitt anhand der oberflächlich gemessenen Potentialdifferenzen



Generierung farbiger Widerstandstomogramme zur Diagnose widerstandsrelevanter holzphysiologischer Veränderungen in der Stammquerschnittsfläche der Messebene wie Fäulen und andere Defekte (s. Anwendungsbereiche)



Projektgruppe „Non Destructive Testing of Trees“

Prof. Dr. Ulrich Weihs FON: +49/0551/5032-259
 Dr. Friedemann Krummheuer FAX: +49/0551/5032-299
 Dipl. Forst-Ing. Niels Hoffmann Email: info@dendrolog.de
 Dr. Bettina Hanskötter www.dendrolog.de

Fotos, Layout und inhaltliche Gestaltung: U. Weihs

Abb. 1: Funktionsweise der Baumdiagnose mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“

3 Anwendungsbeispiele

Der Diagnose von Fäule in stehenden Bäumen kommt im Rahmen der Verkehrssicherungspflicht im öffentlichen Grün und im Forst eine große Bedeutung zu. Dabei reicht die Methodenvielfalt zur Diagnose am stehenden Baum von der einfachen Klopfmethode über die Entnahme von Bohrkernen und die Anwendung des Resistographen sowie des Teredo bis hin zur Schall- und Computertomographie [5, 9, 10].

Große Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden bestehen hinsichtlich des Grades der Holzerstörung und der Sicherheit der Diagnose bei verschiedenen Stammdefekten und Holzveränderungen.

Insgesamt besteht in der Praxis der Baumpflege nach wie vor ein großer Bedarf an geeigneten Meßmethoden, die weitgehend zerstörungsfrei sind und ein zumindest „zweidimensionalen Blick“ in das Bauminnere ermöglichen, dabei mit vertretbarem apparativen Aufwand auskommen und für den Anwender möglichst geringe sicherheitstechnische Risiken mit sich bringen. Diese Anforderungen werden vom Verfahren der „Elektrischen Widerstandstomographie“ erfüllt, dessen praktische Anwendungsmöglichkeit anhand der folgenden Beispiele näher vorgestellt werden soll.

Das erste Anwendungsbeispiel (s. Abb. 2 auf der nächsten Seite, erste Bildreihe) zeigt eine zentrale Stammfäule in einer Linde (*Tilia spp.*) mit einem Stammumfang in 1 Meter Höhe von 2,43 m. Die Kernfäule hat bereits zu einer großen Höhlung im Stamm geführt. In Bezug auf das korrespondierende Widerstandstomogramm und die Überlagerung von Stammscheibe und Tomogramm ist bemerkenswert, wie exakt die Lage und die räumliche Ausdehnung der Kernfäule im Stammquerschnitt abgebildet werden. Der nicht leitende Hohlraum erscheint dabei als schwarzer, sehr hochohmiger, d. h. schlecht leitender Bereich.

Ebenfalls gut getroffen ist die noch im beginnenden Zersetzungsstadium befindliche „feuchte Fäule“ im linken Restwandbereich des Lindenstammes. Im Gegensatz zur hochohmigen „Lochfäule“ wird diese Fäule im Tomogramm als sehr gut leitender, feuchter Bereich blau dargestellt. Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass die oberhalb des Fäuledurchbruches gebildete Überwallungsnarbe aufgrund ihrer trockenen Rindeneinwachsungen ebenfalls deutlich als schlecht leitender Bereich aus dem Widerstandstomogramm hervorgeht.

Das Beispiel 2 zeigt eine spannrückige Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) mit Rindeneinwachsungen an der Nordseite (s. Abb. 2, zweite Bildreihe von oben), die in der Messebene eine zentral von NNO nach SSW verlaufende, ovale Faulstelle aufweist. Der Stammumfang des Baumes in der Messebene von 60 cm Höhe betrug 1,88 m.

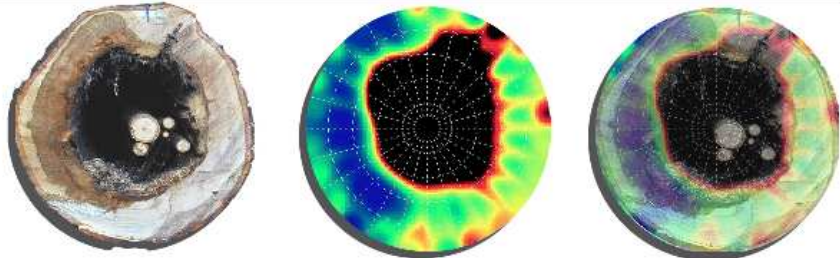
Im Gegensatz zur Kernfäule der Linde hat die Weißfäule bei dieser Buche noch keine Höhlung im Stamm hervorgerufen. Die Fäule befindet sich vielmehr in einem Zersetzungsstadium, das sich sowohl durch eine erhöhte Holzfeuchtigkeit als auch einen erhöhten Elektrolytgehalt aus-

zeichnet. Entsprechend weist die blaue Farbe des Widerstandstomogrammes im Bereich der Faulstelle eine deutlich erhöhte Leitfähigkeit aus.

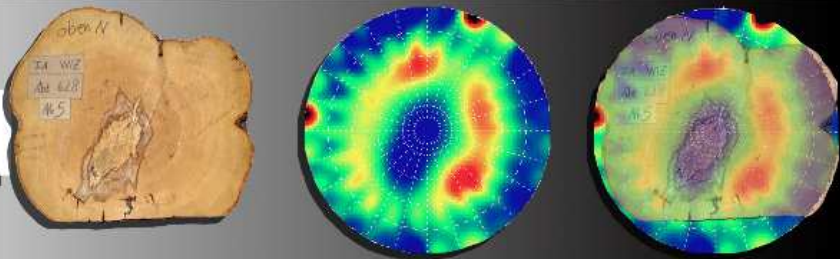
Anwendungsbereiche

Diagnose von Fäulen und anderer Defekte im stehenden Stamm zur Beurteilung der Standsicherheit im Rahmen der Straßenverkehrssicherungspflicht

Stammfäule bei Linde
(*Tilia cordata* Mill.)

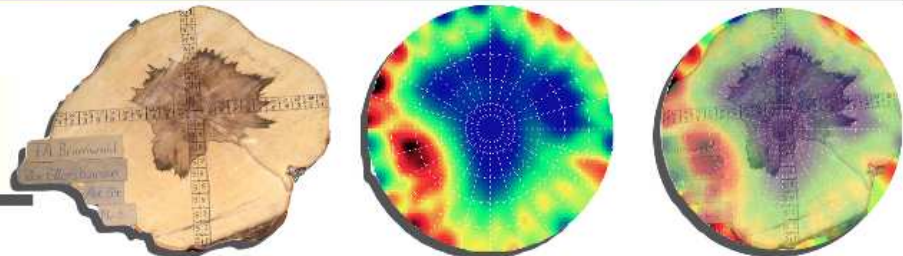


Weißfäule bei Rotbuche
(*Fagus sylvatica* L.)



Diagnose von wertmindernden Farbkerne bei forstwirtschaftlich bedeutsamen Baumarten zur Bestimmung des optimalen Nutzungszeitpunktes

Abnormer Farbkeim bei Rotbuche
(*Fagus sylvatica* L.)



Braunkern bei Esche
(*Fraxinus excelsior* Mill.)

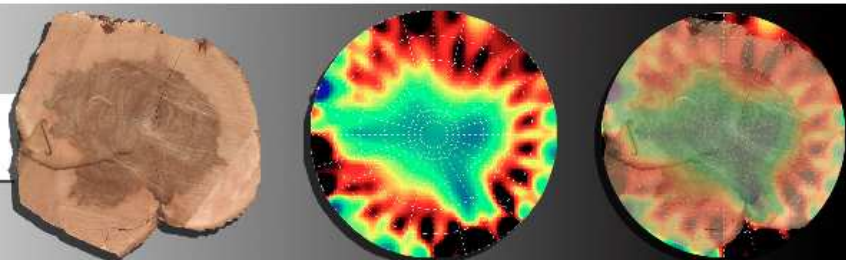


Abb. 2: Anwendungsbereiche der Baumdiagnose mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“

Die Lage und die räumliche Ausdehnung der Weißfäule im Stammquerschnitt werden entsprechend als gut leitender Bereich abgebildet. Um die Faulstelle herum hat die Buche eine im Tomogramm deutlich sichtbare schlechter leitende Abwehrzone aufgebaut. Nach SHIGO und MARX [8] werden solche Barrieren zur Abgrenzung der Fäule vom neu gebildeten, gesunden Holz im Baum angelegt. HOLDENRIEDER [3] weist darauf hin, dass die Größe dieser mit Ab-

wehrstoffen angereicherten Barrierezonen von der Ausdehnung der Fäule bzw. ehemaligen Wunde und der Vitalität des Baumes abhängen. In der Regel ist die Abschottungszone viel größer als die eigentliche Wunde, grenzt die Fäule scharf vom umgebenden gesunden Holz ab und umfasst häufig den ganzen Stammumfang, wie es im obigen Beispiel der Fall ist. Die von der Buche als Reaktion auf die Fäule ausgebildete Abschottungszone ist ferner ein Indiz dafür, dass es sich um eine ehemals von außen eingedrungene Schädigung handelt, da Bäume auf Kernfäulen, die sich z. B. von der Wurzel her kommend axial und radial im Stamm ausbreiten, deutlich schlechter reagieren können [3]. Dies wird an der im ersten Beispiel dargestellten Kernfäule der Linde deutlich, die im Gegensatz zur Buche von innen her ausgemorscht ist und nicht in der Lage war, entsprechende Abwehrzonen aufzubauen.

Die dritte und vierte Bildreihe der Abb. 2 verdeutlichen am Beispiel einer Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) und einer Esche (*Fraxinus excelsior* L.), dass sich mit Hilfe der „Elektrischen Widerstandstomographie“ auch bestimmte Ausprägungen von Farbkernen im Stammholz lebender Bäume diagnostizieren lassen, deren Ausbildung bei forstwirtschaftlich wichtigen Wirtschaftsbaumarten i.d.R. mit einer deutlichen Wertminderung verbunden ist.

In beiden Fällen, sowohl bei der abgebildeten Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) mit einem „abnormer Kern“ als auch bei der Esche mit fakultativem Braunkern, handelt es sich um Farbkern, die sich im Vergleich zum umgebenden weißen Holz durch eine deutlich höhere Darrbezugsfeuchte auszeichnen und somit im elektrischen Widerstandstomogramm als gut leitende, blaue Bereiche dargestellt werden.

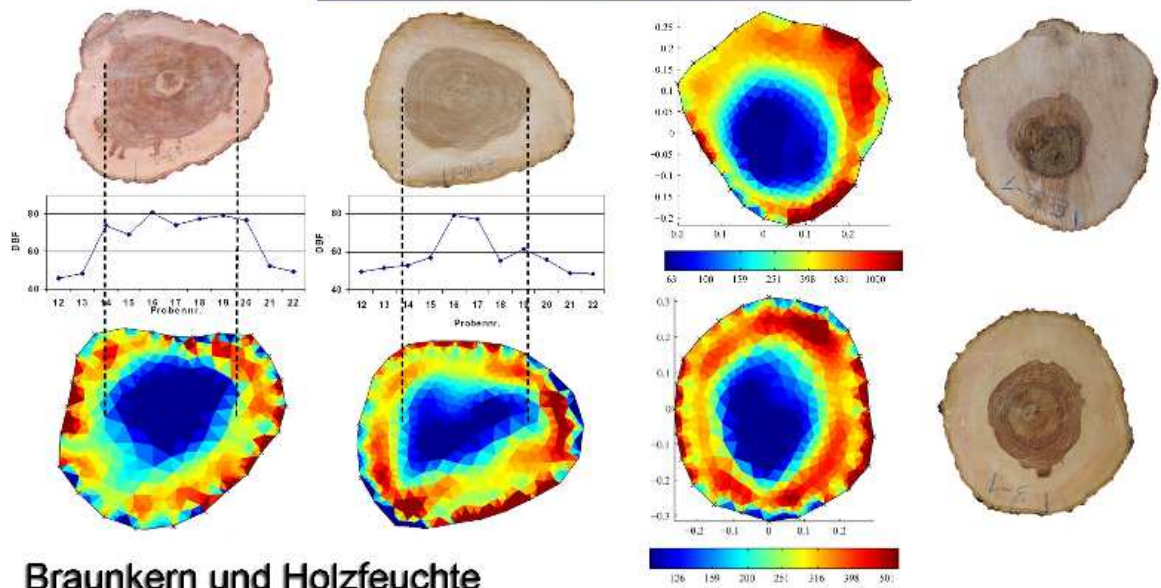
Bei der in allen vier Beispielen zur Erzeugung der Tomogramme verwendeten Inversionssoftware handelt es sich um das Programm „ELTKRN“ von JUST und DANCKWARDT [4], mit dem sich nur eine Kreisgeometrie und nicht die tatsächliche Querschnittsgeometrie des untersuchten Baumstammes abbilden lässt.

In der folgenden Abbildung 3 mit Tomographiebeispielen, die im Zusammenhang mit einer Untersuchung des Eschenbraunkerns [5] erzielt wurden, fand dagegen das Programm „DC2dTree“ von RÜCKER und GÜNTHER [7] Anwendung, das, sofern gewünscht, die tatsächliche Querschnittsgeometrie des untersuchten Baumes berücksichtigt.

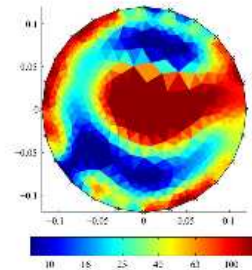
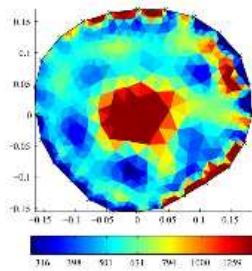
Anhand der in Abb. 3 dargestellten Fallbeispiele soll exemplarisch verdeutlicht werden, dass zur korrekten Interpretation der gewonnenen Widerstandstomogramme eine fundierte Fachkompetenz erforderlich ist und man auch gut beraten ist, zur Klärung von nicht eindeutigen Diagnosefällen eine zweite Untersuchungsmethode zur Absicherung der Baumdiagnose (z. B. Klopfprobe) hinzuzuziehen.

Wie die obere Bildreihe in der Abb. 3 verdeutlicht, wird sowohl der Braunkern als auch eine beginnende Stammfäule aufgrund ihrer im Vergleich zum weißen Holz höheren Darrbezugsfeuchte als elektrisch gut leitender Bereich in blauen Farbtönen dargestellt.

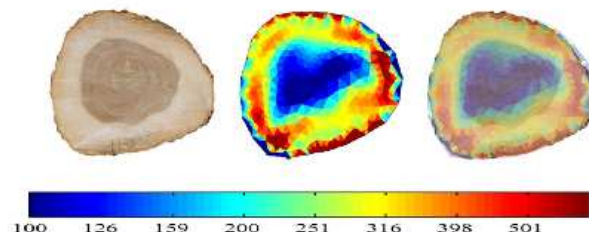
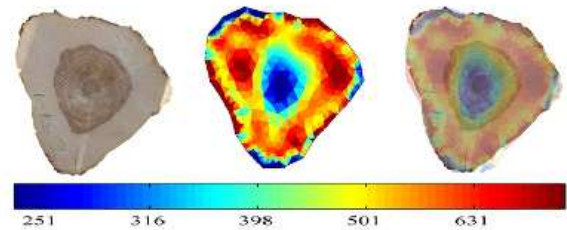
Eschenbraunkern



Braunkern und Holzfeuchte



Fäule und Braunkern



weißes Holz und Hohlfäule

Überlagerung

Abb. 3: Tomographieergebnisse zum Eschenbraunkern

Die Differenzialdiagnose zwischen faulen Bereichen und braunkernigem Holz gestaltet sich somit auf den ersten Blick schwierig. Bei Betrachtung der scheinbaren elektrischen Widerstände der verschiedenen Blautöne kann jedoch aufgrund der wesentlich geringeren Werte im faulen Holz auf die Art der holzphysiologischen Veränderung geschlossen werden. Während die scheinbaren elektrischen Widerstände im braunkernigen Holz nur bis auf minimale Werte von 126 Ωm heruntergehen, liegt der Bereich mit faulem Holz mit 63 Ωm nur bei der Hälfte dieses Wertes und geht in Einzelfällen sogar bis auf 30 Ωm zurück. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den in den Tomogrammen dargestellten elektrischen Widerstandswerten nicht um tatsächliche Widerstandswerte handelt, sondern um scheinbare elektrische Wider-

stände die das Ergebnisse der rechnerischen Anpassung zur Erzeugung der Tomogramme sind (Inversionsverfahren).

Eine genauere Betrachtung erfordert auch die Differenzierung zwischen weißem Holz und einer Hohlfäule, wie sie in Abbildung 3 unten links dargestellt ist. Das unverfärbte Kernholz im Zentrum des Stammes wird wegen seines geringeren Wassergehaltes als hochohmiger, dunkelroter Bereich dargestellt. Es ist umgeben von nieder- bis mittelohmigen Bereichen, die sich in Blau- und Grüntönen darstellen. Diese Erscheinung der von außen nach innen zunehmenden scheinbaren elektrischen Widerständen ist typisch für weiße Stämme, da unverfärbtes Kernholz eine vergleichsweise geringe elektrische Leitfähigkeit besitzt.

Ähnlich wie unverfärbtes Kernholz wird aber auch eine Hohlfäule im Tomogramm durch rote, hochohmige Bereiche dargestellt. In diesem Fall weist jedoch der asymmetrischen, nicht konzentrischen Aufbau des Widerstandstomogramms auf die Anomalie bzw. Abweichung zum gesunden Zustand hin. Wie die Abb.3 zeigt, ist die beobachtete Hohlfäule, bis auf einen Durchbruch im Osten, vollständig von einem gut leitenden „Faulring“ umgeben. Obwohl dieser Ring den nicht leitenden Hohlraum für die „Elektrische Widerstandstomographie“ fast vollständig verschleiert, wird die damit nur schwer zu diagnostizierende Höhlung sehr präzise abgebildet. Auch die alte Verletzung im Südwesten der Stammscheibe, welche Ausgangspunkt für die Fäule und Hohlstelle gewesen sein dürfte, hebt sich im Tomogramm deutlich als gut leitender, fauler Bereich in Blautönen ab. Zur Absicherung des Ergebnisses wäre hier die Durchführung einer Klangprobe sinnvoll, die den hochohmigen, roten Bereich im Zentrum des Stammes eindeutig als Hohlraum identifizieren würde.

4 Schlussfolgerungen

Wie die vorliegenden Beispiele belegen, lassen sich mit Hilfe der „Elektrischen Widerstandstomographie“ bereits relativ geringe holzanatomische bzw. holzphysiologische Veränderungen im Holzkörper lebender Bäume visuell darstellen, sofern sie mit einer Modifikation der elektrischen Leitfähigkeit einhergehen, wie es insbesondere bei Veränderungen der Holzfeuchte und/oder der Elektrolytgehalte (z. B. Holzfäule) der Fall ist.

Die im Verlauf des Forschungsprojektes „Non Destructive Testing of Trees“ an der HAWK Fakultät Ressourcenmanagement in Göttingen seit nunmehr sechs Jahren gemachten Erfahrungen zeigen, dass es sich bei der „Elektrischen Widerstandstomographie“ um ein in vielen praxisrelevanten Fällen geeignetes Verfahren zur zerstörungsfreien Baumdiagnose handelt.

Ihre Grenzen findet die Baumdiagnose mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“ dort, wo die im Holz zu verzeichnenden Veränderungen nicht mit einer entsprechenden Veränderung der Widerstandsverteilung einhergehen, das heißt, nicht zu visuell interpretierbaren Kontrasten im Widerstandstomogramm führen, wie es zum Beispiel beim altersphysiologisch bedingten

Rotkern der Rotbuche der Fall ist, der sich hinsichtlich seiner elektrischen Leitfähigkeit nicht oder nur zufällig vom weißen Reifholz unterscheidet.

Ferner ist für eine treffsichere Diagnose die Kenntnis der baumartenspezifisch sehr unterschiedlichen elektrischen Leitfähigkeit des Stammholzes und seiner holzphysikalischen und holzchemischen Ausprägungsvarianten notwendig.

5 Literatur

- [1] BOSSHAERD, H.H. (1955): Zur Physiologie des Eschenbraunkerns, SZFF., 106. Jg., S. 592-612.
- [2] FITZNER, S. und SCHILLING, M. (2005): Der Eschenbraunkern und seine Diagnose mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“. Diplomarbeit an der HAWK Göttingen, Fakultät Ressourcenmanagement, 80 S. unveröffentlicht.
- [3] HOLDENRIEDER, O. (1994): Angriff und Abwehr im Baum: Die Entstehung von Kernfäulen; Schweiz. Z. Forstwes., 145
- [4] JUST, A. und JACOB, F. (1998): Elektrische Widerstandstomographie zur Untersuchung des Gesundheitszustandes von Bäumen; VII. Seminar „Hochauflösende Geoelektrik“, Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie
- [5] NIEMZ, P., BODMER, H.-C., KUCERA, L. J., RIDDER, H.-W., HABERMEHL, A., WYSS, P., ZÜRCHER, E. und HOLDENRIEDER, O. (1998): Eignung verschiedener Diagnosemethoden zur Erkennung von Stammfäulen bei Fichte. Schweiz. Z. Forstwes. 149, 615-630.
- [6] REYNOLDS, J. M. (1997): *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*; John Wiley & Sons, Chichester
- [7] RÜCKER C. und GÜNTHER, T (2004): Hochauflösende Geoelektrik. Tagungsband des 10. Arbeitsseminars der Universität Leipzig, Institut für Geophysik und Geologie.
- [8] SHIGO, A. L. und MARX, G. (1997): Compartmentalization of decay in trees . Agriculture Information Bulletin No. 405, Forest Service, U.S. Department of Agriculture
- [9] STENLID, J. and WÄSTERLUND, I. (1986): Estimating the frequency of stem rot in *Picea abies* using an increment borer.-Scand. J. For. Res. 1, 303-308.
- [10] TOMICEK, CH. (1996): Methodenvergleich zur Abschätzung der Rotfäule an Fichte. Österr. Forstztg., 45-46.
- [11] WEIHS, U. (2001): Farbkerndiagnose am stehenden Elsbeerenstamm. AFZ/Der Wald, Heft 6, S. 268-270.
- [12] WEIHS, U., DUBBEL, V., KRUMMHEUER, F. und JUST, A. (1999): Die elektrische Widerstandstomographie -Ein vielversprechendes Verfahren zur Farbkerndiagnose am stehenden Rotbuchenstamm-. Forst und Holz 54, S. 166-169.
- [13] WEIHS, U.; KRUMMHEUER, F. und DUBBEL, V. (2001): Zerstörungsfreie Baumdiagnose mittels elektrischer Widerstandstomographie. Jahrbuch der Baumpflege 2001, THALACKER MEDIEN, Braunschweig, S. 270-278.
- [14] WEIHS, U.; HOFFMANN, N; FITZNER, S.; SCHILLING, M. (2005): Diagnose des Eschenbraunkerns mittels „Elektrischer Widerstandstomographie“. AFZ-DerWald 20/2005 S. 1093-1096.