

Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation

D. Eckstein, U. Saß

Bohrwiderstandsmessungen an Bäumen dienen der Beurteilung ihrer Bruchsicherheit. Für Laubhölzer ist aber die Interpretation der Meßwerte noch unsicher. Daher wurden Bohrwiderstandsprofile von Laubhölzern erstellt und mit der lokalen Holzanatomie verglichen. Als Einflüsse dienten die Rohdichte und Holzfeuchte, pathologische Veränderungen des Holzes sowie verfahrensbedingte Faktoren. Der Bohrwiderstand gibt Auskunft über die Struktur und den Zustand des Holzes im Stamminneren. Er läßt das Niveau sowie abrupte Änderungen des Zuwachses erkennen, ermöglicht aber keine lückenlose Identifizierung aller Jahrringgrenzen. Die Holzfeuchte modifiziert die Meßwerte. Verfahrensbedingte Einflüsse müssen bei der Interpretation der Messungen berücksichtigt werden. In pathologisch verändertem Holz wurden die Bohrwiderstandsspitzen rasterelektronenmikroskopisch aufgeklärt. Eine Braunfäule führt im Vergleich zu einer Weißfäule bereits bei geringerem Masseverlust des Holzes zu einer Erniedrigung des Bohrwiderstandes.

Measurements of the drill resistance in broad-leaf trees and their wood-anatomical interpretation

The determination of the drill resistance is a technique for assessing the stability of trees. In the case of broad-leaf trees, however, the interpretation of these measurements is still unreliable. Therefore, profiles of the drill resistance of broad-leaf trees have been made and compared to the local wood anatomy. Intrinsic factors such as wood density and moisture content were considered, as well as pathogenic alterations in the wood and factors involved in the measuring technique. The drill penetration measurements provide information on the structure and status of the interior wood of tree trunks. They also indicate the growth level and any abrupt changes in growth, but do not enable the complete identification of all tree-ring borders. The profiles are modified by the wood moisture. Factors connected with the drilling process have to be taken into account when interpreting the measurements. In the case of pathogenically altered wood, the peaks of the drill resistance profiles were explained by means of scanning electron microscopy. In comparison to white rot, brown rot causes a reduction in drill resistance even at lower values of dry weight loss.

Universität Hamburg, Ordinariat für Holzbiologie, Leuschnerstr. 91, D-21031 Hamburg, Deutschland

Herrn Prof. Dr. D. Fengel, München, aus Anlaß seines Ausscheidens aus dem Dienstgewidmet.

Die Qualitätsgemeinschaft Baumpflege und Baumsanierung e.V. hat die Untersuchung finanziell gefördert. Die Firmen deritec GmbH in Lauf und IML GmbH in Wiesloch haben das Bohrgerät Resistograph 1410 zur Verfügung gestellt. Herr Richard Pohl hat die Messungen durchgeführt, während Frau Sabine Kruse die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen anfertigte. Wir danken allen für ihre Unterstützung.

1 Einführung und Zielsetzung

Bohrwiderstandsmessungen werden zur Begutachtung der Bruchsicherheit von Straßen und Parkbäumen sowie der Festigkeit von verbautem Holz eingesetzt (z.B. Rinn 1988, Görlacher, Hättich 1990, Bemann, Klingler 1993). Für Nadelhölzer haben Rinn et al. (1995) eine gute Übereinstimmung zwischen dem Bohrwiderstand und der Röntgendichte des Holzes gefunden. Vergleichbare Untersuchungen für die holzanatomisch heterogenen Laubhölzer liegen noch nicht vor, sind jedoch erforderlich, um Fehlinterpretationen von Bohrwiderstandsprofilen zu vermeiden.

In der vorliegenden Untersuchung werden (1) die Bohrwiderstandsprofile einiger einheimischer Laubbaumarten mit der örtlichen Anatomie ihres Holzes verglichen. Dabei werden (2) auch die Rohdichte und Holzfeuchte berücksichtigt. Ferner werden (3) verfahrensbedingte Einflüsse beobachtet. Orientierend wird (4) der Einfluß pathologischer Veränderungen des Holzes auf den Bohrwiderstand betrachtet.

2 Material und Methoden

Es lagen saftfrische Stammscheiben von Eiche, Esche und Robinie als ringporige Baumarten vor; die Eichen waren extrem weitringig. Als zerstreutporige Baumarten wurden Buche, Hainbuche, Ahorn, Birke und Pappel einbezogen. Die Auswirkung von Abschottungszonen auf den Bohrwiderstand wurde an Linde, Roßkastanie und Esche, von Falschverkernung an Buche und Esche untersucht.

Der Einfluß eines Pilzbefalls wurde an trockenen Kiefernklötzchen ($50 \times 25 \times 6 \text{ mm}^3$) geprüft. Sie waren von einer Braunfäule (Brauner Kellerschwamm (*Coniophora puteana*)) bzw. Weißfäule (Schmetterlingsporling (*Coriolus versicolor*)) unterschiedlich intensiv abgebaut.

Die Bohrwiderstandsmessung erfolgte mit dem Resistograph 1410 (Rinn 1992) (Bild 1a); er mißt den Widerstand an einer Bohrnadel, die mit konstanter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit in das Holz eindringt. Der Bohrnadelkopf ist 3 mm breit und mit einer Zentrierspitze versehen; der Nadelschaft hat einen Durchmesser von 1,5 mm (Bild 1b). Daraus ergibt sich für den Bohrkanaal ein Durchmesser von 3 mm, so daß für die Aufnahme des anfallenden Bohrmehls 75% des Bohrkanaalraumes zur Verfügung stehen. Die Vorschubgeschwindigkeit betrug bei allen Messungen 5 cm/min. Die Bohrung erfolgte senkrecht zu den Jahrringgrenzen sowohl an saftfrischem als auch an trockenem Holz (Ausgleichsfeuchte < 10%).

Die geschliffenen Holzoberflächen (Papierkörnungen von 220, 320, 500, 800 und 1200) wurden mit den zugehörigen Bohrwiderstandsprofilen im Maßstab 1:1 unter einem Auflichtmikroskop verglichen. Der Vergleich anhand von Dünnschnitten erfolgte mit den angemessen vergrößerten Bohrwiderstandsprofilen mit einem Durchlichtmikroskop.

Der tatsächliche Dichteverlauf in den gebohrten Holzproben wurde mit Hilfe eines Farbbildanalyse-Systems der Firma

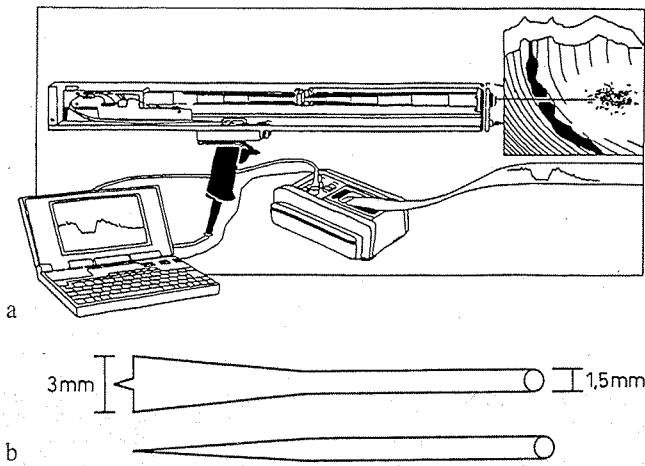


Bild 1 a, b. Das Resistograph-System (a) und die Geometrie des Bohrnelkopfes (b) (Zeichnung F. Rinn)

Fig. 1 a, b. The resistograph equipment (a) and the geometry of the needle tip (b)

Olympus ermittelt; zur Präparation siehe Saß und Eckstein (1994). Die Meßwertaufnahme erfolgte bei 250facher Vergrößerung innerhalb eines Meßrahmens von 1 mm (tangential) \times 40 μ m (radial); 40 μ m beträgt auch die theoretische Auflösung der Bohrwidstandsmessung. Aus der gemessenen Zellwandfläche wurde ein Profil entlang des Bohrkanals zusammengesetzt und mit dem Bohrwidstandsprofil verglichen.

Die in den Bohrwidstandsprofilen verschiedener Laubhölzer auffälligen örtlichen Dichtespitzen zwischen gesundem und pathologisch verändertem Holz wurden rasterelektronenmikroskopisch untersucht.

3

Ergebnisse und Diskussion

Die Bohrwidstandsprofile zeigen auf der x-Achse die Eindringtiefe der Bohrnel in den Holzkörper, auf der y-Achse die Stromaufnahme des Motors. Der Bohrwidstand schwankt bei der gewählten Vorschubgeschwindigkeit als dimensionslose Größe zwischen 500 und 3000 (Bild 2).

Nach Rinn (1992) setzt sich der Bohrwidstand aus der Zerspanungs- und der Verdrängungsarbeit an der Nadelspitze und aus der Reibung des Bohrnelchaftes im Bohrkanal zusammen. Die Zerspanungsarbeit beschreibt die Schnittleistung, während die Verdrängungsarbeit zur Verdichtung des Bohrmehls auf 75% des Bohrkanalraumes geleistet wird. Die Reibung des Bohrnelchaftes im Bohrkanal baut sich mit zunehmender Eindringtiefe in das Holz auf. Alle drei Komponenten hängen von der Holzstruktur, der lokalen Rohdichte des Holzes und der Holzfeuchte ab.

3.1

Verfahrensbedingte Einflüsse

Zu Beginn der Bohrung, d.h. über eine Strecke von 10 bis 20 mm steigt der Widerstand langsam an, da zunächst das Bohrmehl

noch ausgeworfen wird (vgl. Bild 2) Zur Überprüfung dieser Annahme wurde ein 25 mm dickes Klötzchen vor die Holzprobe gespannt. Der beobachtete Anfangseffekt verlagerte sich erwartungsgemäß in dieses Klötzchen. Ein ähnliches Verhalten trat in Bereichen extrem geringer Holzdichten (z.B. bei breitem Eichenfrühholz) oder nach Innenrisen auf.

Vielfach nimmt der Bohrwidstand über das gesamte Profil kontinuierlich zu, vor allem bei dichten Hölzern (Eiche, Buche). Um zu unterscheiden, ob dieser Trend verfahrens- oder strukturbedingt ist, wurden einige Bohrungen sowohl von der Rinde zum Mark als auch in umgekehrter Richtung vom Mark zur Rinde durchgeführt. Mit Umkehr der Bohrrichtung kehrt sich der Bohrtrend ebenfalls um, womit gezeigt wird, daß es sich hier um ein verfahrensbedingtes Phänomen handelt (vgl. Bild 2). Unabhängig von der Bohrrichtung liegt das Leerlaufniveau nach dem Austritt des Bohrers aus dem Holz meist höher als vor dem Eintritt in das Holz. Dieser Versatz sowie der Bohrtrend sprechen für eine verstärkte Reibung des Bohrnelchaftes im Bohrkanal mit zunehmender Eindringtiefe. Das Öffnen einiger Bohrkanäle gab hierüber Aufschluß. Der Bohrkanal war niemals stark gekrümmt, bei dichtem Holz jedoch wellig in seinem Verlauf. So schwankte er bei einer trockenen Eichenprobe um ca. 1 mm mit einer Wellenlänge von ca. 7 mm (Bild 3). Auch der Bohrkanal durch eine feuchte Ahornprobe verlief wellig. Derartige Schwankungen waren bei Hölzern geringer Rohdichte und mit geringem Bohrtrend, wie z.B. bei Birke (vgl. Bild 3), nicht erkennbar. Der wellige Verlauf von Bohrkanälen könnte dadurch hervorgerufen werden, daß die Bohrnel abgelenkt wird, wenn ein Bereich hoher Dichte, wie z.B. an einer Jahrringgrenze, nicht genau senkrecht getroffen wird. Bei hoher Rohdichte steigt auch der Schnittleistungsbedarf und somit der Druck auf die Nadelspitze. Als Folge nimmt die Durchbiegung der Nadel im Bohrkanal und damit auch die Reibung zwischen Nadelchaft und Wand zu. Zudem ist die zu verdichtende Bohrmehlmenge größer als bei weniger dichten Holzarten, so daß der verbleibende Kanalraum kleiner wird.

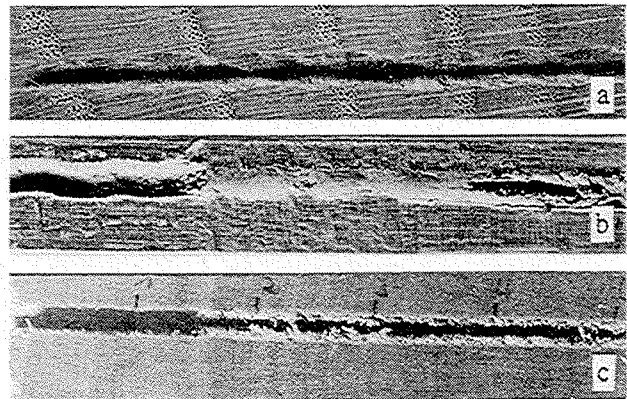


Bild 3 a-c. Geöffnete Bohrkanäle von Eiche (a), Ahorn (b) und Birke (c)
Fig. 3 a-c. Opened bore canals of oak (a), maple (b), and birch (c)

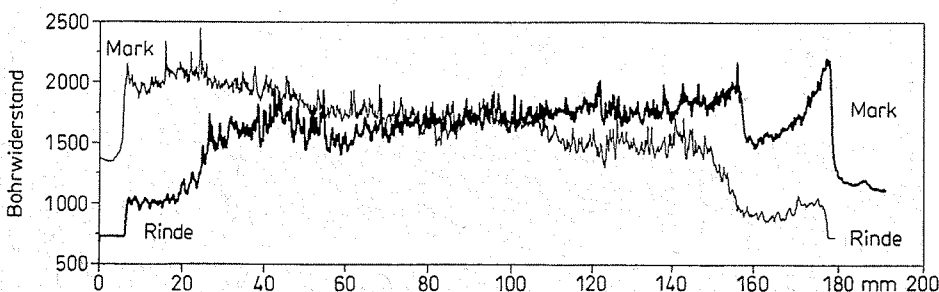


Bild 2. Bohrwidstandsprofile einer trockenen Buche; gebohrt von der Rinde zum Mark (fett) und vom Mark zur Rinde
Fig. 2. Drill-resistance profiles of dry beech; penetration from bark to pith (thick line) and from pith to bark

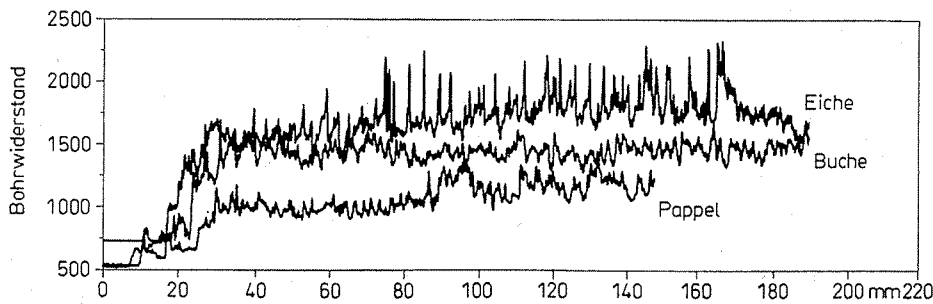


Bild 4. Bohr widerstandsprofile einer feuchten Eiche, Buche und Pappel
Fig. 4. Drill-resistance profiles of moist oak, beech, and poplar

Der Bohrtrend stellt, wenn er mit einem Versatz des Leerlaufniveaus am Anfang und Ende der Bohrung gekoppelt ist, ein Artefakt dar und bedeutet keine Veränderung der Holzstruktur. Davon zu unterscheiden ist der strukturelle Alterstrend aufgrund der Zunahme der Gefäßanteile und -flächen mit zunehmender Entfernung vom Mark (Zobel, van Buijtenen 1989). Eine Unterscheidung beider Trends ist nur durch die Umkehrbohrung möglich.

3.2 Holzphysikalische Einflüsse

Mit zunehmender Rohdichte eines Holzes steigen in der Regel auch dessen Festigkeiten. Dies zeigt sich z.B. darin, daß der Schnittleistungsbedarf beim Fräsen mit der Rohdichte des Holzes zunimmt (Fortuin und Frühwald 1987). Le Naour (1988) fand eine enge positive Korrelation zwischen der Rohdichte von Holz und dem Bohr widerstand eines 10 mm dicken Bohrers. Die vorliegende Untersuchung hat die Ergebnisse von Görlacher und Hättich (1990) bestätigt, wonach die mittlere Rohdichte eines Holzes das Niveau des Bohr widerstandsprofils beeinflusst (Bild 4).

Das Bohr widerstandsniveau lag bei feuchtem Holz ($u = \text{ca. } 60$ bis 100%) zumeist höher als bei trockenem Holz ($u = \text{ca. } 10\%$) (Bild 5). Besonders offenkundig ist dies bei Hölzern geringer Rohdichte, wie Pappel und Birke, wo mit der Feuchte auch die Rohdichte ansteigt. Die Festigkeit nimmt von 0 bis ca. 9% Holzfeuchte zunächst zu, da nach Kollmann (1951) eine im darrtrockenen Zustand vorhandene Zugvorspannung ausgeglichen wird. Danach von ca. 8% bis zur Fasersättigung sinkt die

Festigkeit stetig ab. In gleichem Maße verändert sich z.B. der Schnittleistungsbedarf beim Fräsen (Pahlitzsch und Mehrdorf 1962) und beim Bohren von Holz mit Werkzeugen großer Durchmesser (10 mm) (Le Naour 1988). Dennoch ist der Bohr widerstand von feuchten Proben höher als von trockenen Proben. Dies deutet darauf hin, daß der bei Holzfeuchten über Fasersättigung geringere Schnittleistungsbedarf durch die zusätzlich erforderliche Energie für die Komprimierung des feuchten Bohrmehls überkompensiert wird.

Bei feuchten Proben traten mehr langwellige und weniger hochfrequente Schwankungen in den Profilen auf als bei trockenen Proben; besonders ausgeprägt war dies bei Pappel (vgl. Bild 5b). Die örtlichen Dichteschwankungen scheinen bei feuchtem Holz weniger klar aufgelöst zu sein. Für eine genauere Bewertung dieser Beobachtung werden im folgenden die Bohr widerstandsprofile mit den Holzoberflächen bzw. mit Dünnschnitten verglichen und bildanalytische Dichteprofile herangezogen. Im Vordergrund stand hierbei, die Erkennbarkeit von Jahrringgrenzen in den Bohr widerstandsprofilen zu prüfen.

3.3 Einflüsse der Holzstruktur

In Bild 6 werden einige unterschiedliche Holzstrukturen in Erinnerung gerufen. Die ringporige Eiche (Bild 7) zeigte insbesondere in Rindennähe abrupte Dichteschwankungen. Extrem niedrige Dichten markieren das Frühholz und dienen somit als Indikator für eine Jahrringgrenze. In vielen Eichenjahrringen gab es zwei Dichtemaxima: eines beim Übergang der Bohrnadel aus dem Frühholz eines Jahrringes in das Spätholz des folgenden

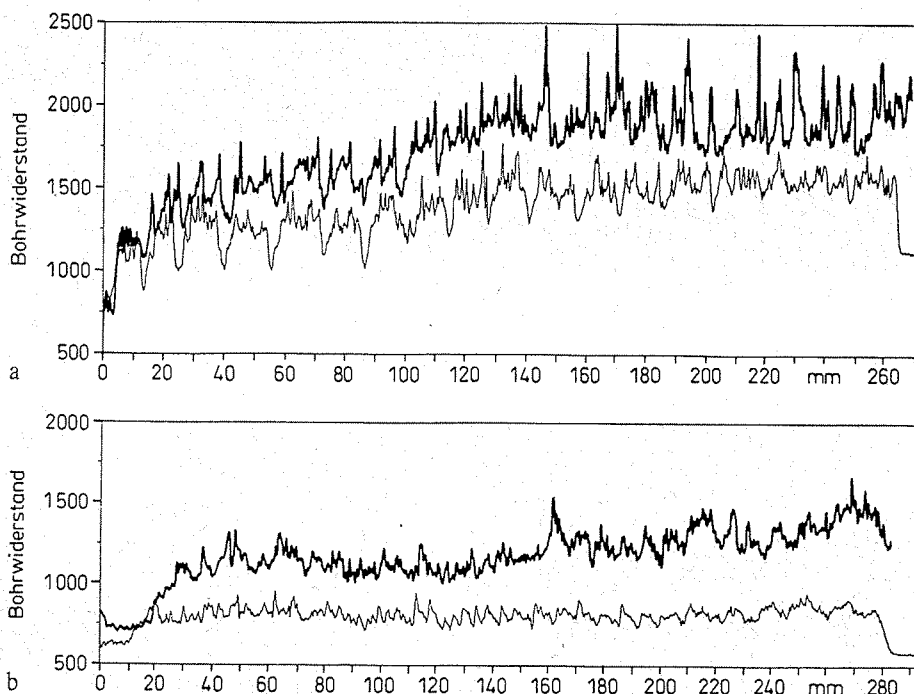


Bild 5 a, b. Bohr widerstandsprofile von saftfrischer (fett) und trockener Eiche (a) und Pappel (b)
Fig. 5 a, b. Drill-resistance profiles of moist (thick line) and dry oak (a) and poplar (b)

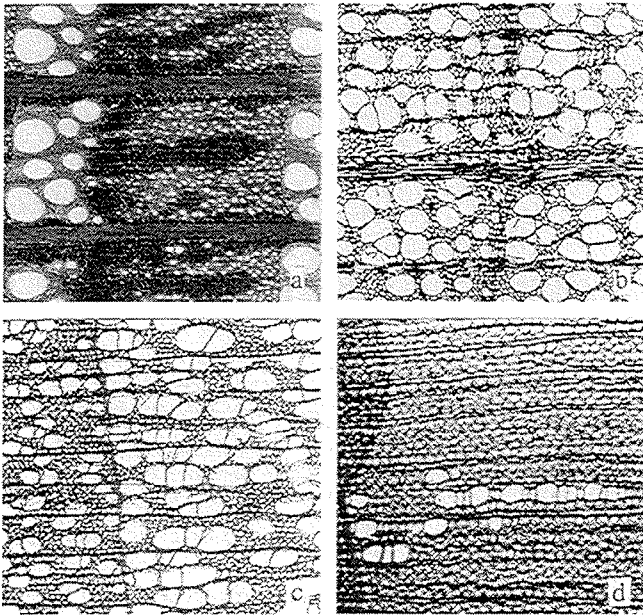


Bild 6 a–d. Jahrringstruktur von Eiche (a), Buche (b), Pappel (c) und Hainbuche (d)

Fig. 6 a–d. Tree-ring structure of oak (a), beech (b), poplar (c), and hornbeam (d)

Jahrringes., ein weiteres, das häufig höher als das erste ausfiel, trat unmittelbar nach den Frühholzgefäßen auf, wenn ein gefäßfreier Faserbereich durchbohrt wurde. Die große Ähnlichkeit zwischen den Bohr widerstands- und Bildanalyseprofilen zeigt, daß das Bohr widerstandsprofil tatsächlich die Dichteschwankungen beschreibt.

Bei Eichenholz führt auch die Verkernung (Imprägnierung der Zellwände mit Kerninhaltsstoffen und Verthyllung der Gefäße) zu einer Dichteveränderung. Bei der vorliegenden Eichenprobe wurden die ersten verthyllten Gefäße im – von der Rinde aus – neunten Jahrring beobachtet. Hier begann in den Bohr widerstandsprofilen des trocken und insbesondere des feucht gebohrten Holzes ein Bereich von weniger extremen Dichteminima, was die Bestimmung der Jahrringgrenzen erschwert. In der feucht gebohrten Eichenprobe fielen zudem Dichtemaxima auf, die weder in der trocken gebohrten Probe

noch im Bildanalyseprofil vorkamen (vgl. Abb. 5a). Sie waren vorwiegend in der Spätholzmitte lokalisiert und konnten anatomisch nicht erklärt werden.

In Marknähe kommt es geometrisch bedingt zu einer Krümmung der Jahrringgrenzen, so daß die Bohrnadel gleichzeitig im Frühholz des einen und im Spätholz des folgenden Jahrrings schneidet. Dadurch wurden z.B. die Frühholz zonen nicht mehr sauber abgebildet und treten im Bohr widerstandsprofil nur unscharf oder gar nicht auf. Bei der im vorliegenden Fall extrem weitringigen Eichenprobe war die Bestimmung der Jahrringgrenzen anhand der Bohr widerstandsprofile von sowohl trocken als auch feucht gebohrtem Holz möglich; ausgenommen in Marknähe. Problematisch war die Jahrringerkennung bei aufeinanderfolgenden schmalen Jahrringen, die im Extremfall fast ausschließlich aus Frühholz bestehen.

Bei zerstreutporigen Laubhölzern war die Jahrringerkennung schwieriger, da es keine deutliche strukturelle Trennung zwischen Früh- und Spätholz gibt. In den Bohr widerstandsprofilen von Buche (Bild 8) und Pappel (Bild 9) waren abrupte Dichteveränderungen mit ausgeprägten Maxima auffällig. Sie traten bei trocken gebohrten Proben stärker auf als bei dem feucht gebohrten Holz. Das für die Buche mitdargestellte Bildanalyseprofil (vgl. Abb. 8) erlaubte eine sichere Bestimmung aller Jahrringgrenzen, auch von schmalen Zuwächsen. Am Jahrring anfang ist die minimale Dichte mit den großen Gefäßen identisch. Die Dichtemaxima, hervorgerufen durch wenige Reihen abgeplatteter und dickwandiger Fasern, beschreiben das Ende eines Jahrrings. Die intraannuellen Dichteschwankungen in breiten Jahrringen führten bei der Buche in der Regel nicht zu einer Fehlinterpretation. Bei der Pappel (Bild 9) können sie ein Problem darstellen, da die annuellen Dichteschwankungen insgesamt weniger stark ausgeprägt sind als z.B. bei der Buche. Schwierigkeiten ergaben sich für diese zerstreutporigen Baumarten bei mehreren aufeinanderfolgenden schmalen Jahrringen. Beim Vergleich des Bohr widerstandsprofils mit der Holzoberfläche war es zwar möglich, kleine Dichtespitzen mit Jahrringgrenzen zur Deckung zu bringen, allein aus dem Bohr widerstandsprofil war dies aber nicht entscheidbar. Im Bohr widerstandsprofil der trockenen Buche und Pappel waren aufeinanderfolgende schmale Jahrringe, falls die Grenzen senkrecht getroffen wurden, durch eine Abnahme des Bohr widerstandsniveaus und der hochfrequenten Schwankungen gekennzeichnet. Bei der feuchten Buche war es

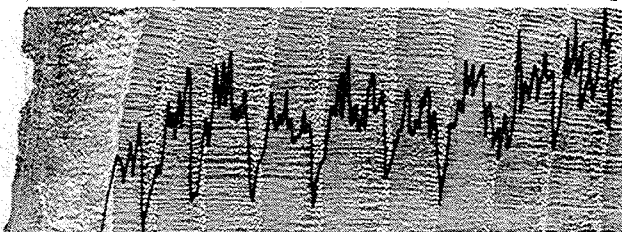
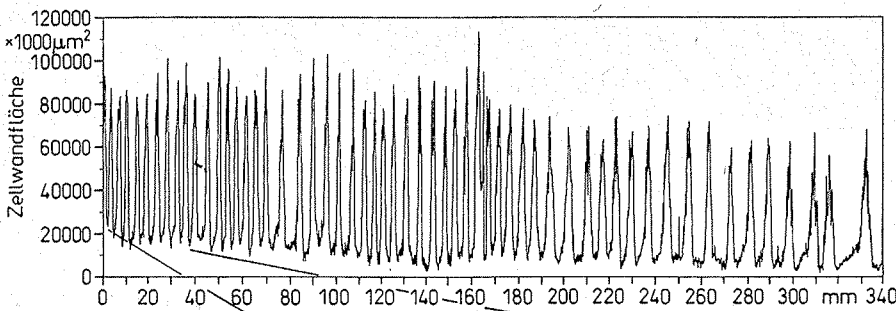


Bild 7. Holzoberfläche von Eiche mit zugehörigem Bohr widerstandsprofil und Bildanalyseprofil (oben)

Fig. 7. Sample surface of oak with drill-resistance profile superimposed, and image-analysis profile (top)

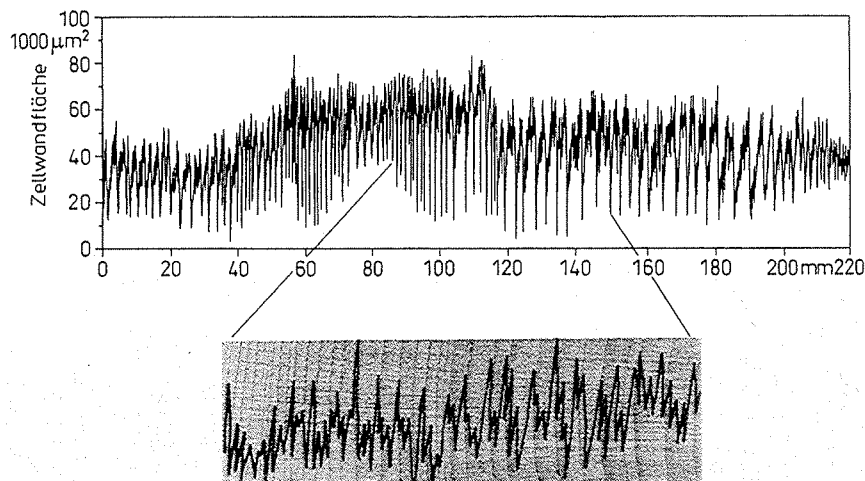


Bild 8. Holzoberfläche von Buche mit zugehörigem Bohrwiderstandsprofil und Bildanalyseprofil (oben)
Fig. 8. Sample surface of beech with drill-resistance profile superimposed, and image-analysis profile (top)

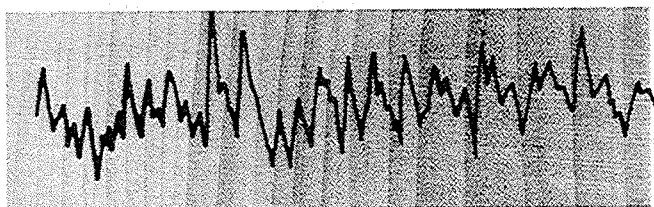


Bild 9. Holzoberfläche von Pappel mit zugehörigem Bohrwiderstandsprofil
Fig. 9. Sample surface of poplar with drill-resistance profile superimposed

schwierig, anhand des Bohrwiderstandsprofils auf Jahrringgrenzen zu schließen. Insbesondere bei schmalen Jahrringen waren die Dichtemaxima nicht sauber abgebildet und verursachten nur geringe Ausschläge. Die Bohrwiderstandsprofile beider Baumarten ermöglichten jedoch den Rückschluß auf das allgemeine Zuwachsniveau und auf eine phasenweise Eng- bzw. Weirringigkeit.

Die Hainbuche (Bild 10) war hinsichtlich der holzanatomischen Interpretation der Bohrwiderstandsprofile problematisch. Die Ursache liegt im anatomischen Aufbau der Jahrringe (vgl. Bild 6d). Die Jahrringgrenze ist durch zwei bis drei Faserreihen markiert und auf dem Dünnschnitt gut erkennbar. Schwierigkeiten ergaben sich durch den welligen Verlauf der Jahrringgrenzen mit auffälligen Einbuchtungen im Bereich der zusammengesetzten Holzstrahlen. Da die Bohrnadel die Dichte tangential über 3 mm integriert, konnte die wellige Jahrringgrenze nicht klar als Dichteschwankung erfaßt werden. Beim Vergleich zwischen dem Dünnschnitt und dem Bohrwiderstandsprofil der trocken gebohrten Hainbuche ließen sich nur einige Jahrringgrenzen identifizieren, die durch eine abrupte Dichteabnahme charakterisiert sind. Die Einschätzung des Zuwachsniveaus anhand des Bohrwiderstandsprofils war

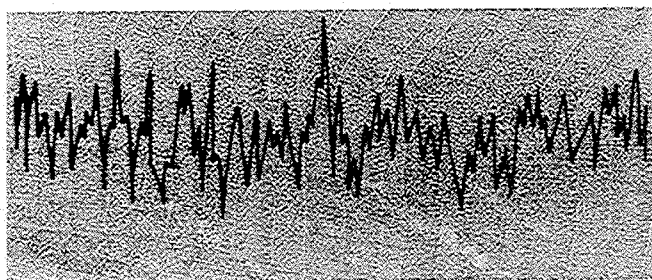


Bild 10. Holzoberfläche von Hainbuche mit zugehörigem Bohrwiderstandsprofil
Fig. 10. Sample surface of hornbeam with drill-resistance profile superimposed

wiederum bei trockenen Proben eher möglich als bei feuchten Proben.

3.4 Einfluß pathologischer Veränderungen

Die Eignung von Bohrwiderstandsmessungen zum Erkennen von Fäulen im stehenden Baum wurde mehrfach belegt (z.B. Bemmann und Klinger 1993). Auch in dieser Untersuchung war es in allen Fällen möglich, eine Innenfäule und ihre Ausdehnung in den Holzproben zu erfassen (Bild 11). Wünschenswert wäre es jedoch zu erfahren, ob eine Braun- oder eine Weißfäule vorliegt.

Bei Bäumen mit einer Innenfäule fallen oft extreme Bohrwiderstandserhöhungen auf (Rinn, pers. Mitt). Zu deren Verständnis wurde je eine Probe von Linde, Roßkastanie und Buche untersucht. Zusätzlich wurden zwei Eschen betrachtet, von denen eine einen Braunkern und die andere zusätzlich einen Pilzbefall in Marknähe aufwies.

An der Grenze zwischen dem verfärbten und dem gesunden Holz der Linde war eine dunkle Abschottungslinie erkennbar (Bild 12). Hier waren die Gefäße und z.T. auch die Fasern mit amorphen und z.T. granulären dunklen Substanzen gefüllt. Ein ähnliches Bild zeigte die Abschottungszone einer Roßkastanie, wo insbesondere die großen Gefäße mit granulären tropfenförmigen Substanzen verstopft waren. Auch hier führten die Einlagerungen zu einer deutlichen Erhöhung des Bohrwiderstands. Bei der Esche war am Übergang zum fakultativen Braunkern keine Bohrwiderstandserhöhung zu beobachten. Bei dem Braunkern mit Pilzbefall trat an der Braunkerngrenze eine Spitze im Bohrwiderstandsprofil mit anschließender abrupter Erniedrigung des Widerstands auf. In den Gefäßen befanden sich Verkrustungen, die auf eine starke Verthyllung und Einlagerung akzessorischer Bestandteile hindeuten (Bild 13).

Bei einer Buche mit weißfaulem Rotkern (Bild 14) waren im Bohrwiderstandsprofil zwei extreme Dichtespitzen sichtbar. Die innere, dunklere Zone markierte die Grenze zum Pilzbefall; derartige Linien treten bei Weißfäule häufig auf. Sie kommen durch eine vermehrte Tätigkeit von Phenylloxidasen zustande, wobei sowohl pilz- als auch baumeigene Substanzen in harte Melanine umgewandelt werden (Butin 1989). Die zweite dunkle Zone

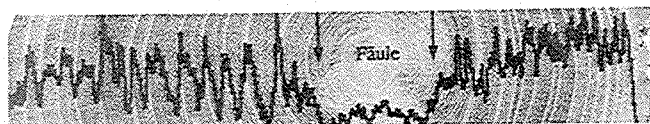


Bild 11. Oberfläche einer kernfaulen Robinie mit zugehörigem Bohrwiderstandsprofil
Fig. 11. Surface of locust with heartrot and drill-resistance profile superimposed

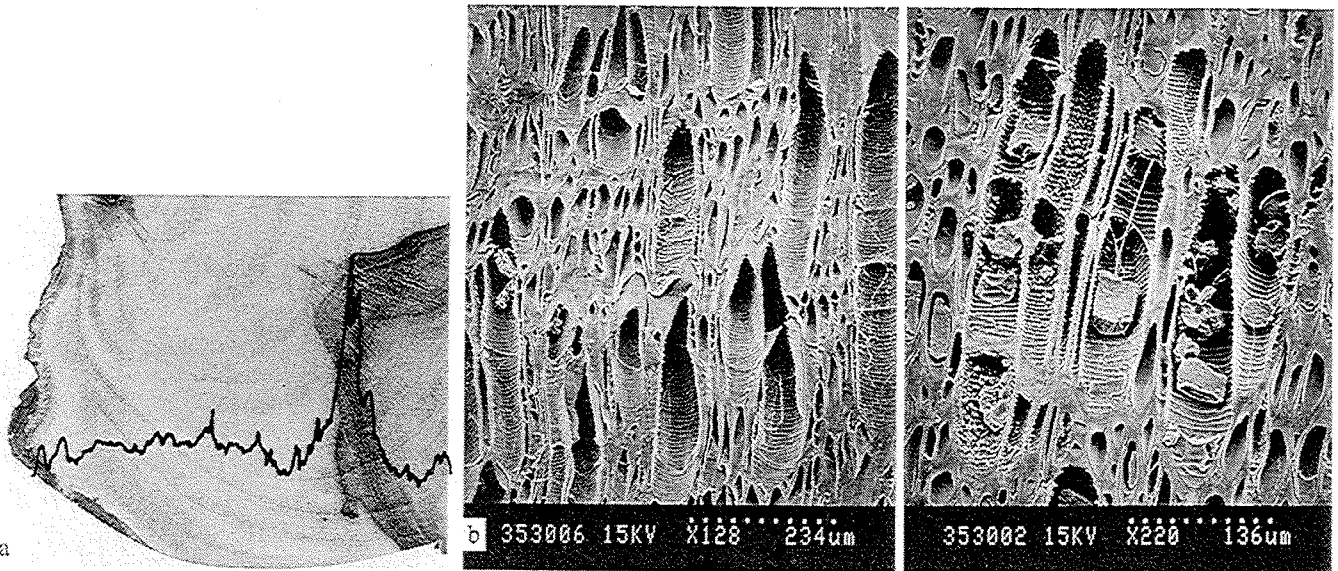


Bild 12 a, b. Holzoberfläche von Linde mit Abschottungszonen im Randbereich einer Fäule (a) und REM-Aufnahmen (b) aus dem gesunden Gewebe (links) und aus der Abschottungszone (rechts)

Fig. 12 a, b. Sample surface of lime with compartmentalized decay (a) and SEM-photographs (b) from an undecayed area (left) and from a compartmentalization zone (right)

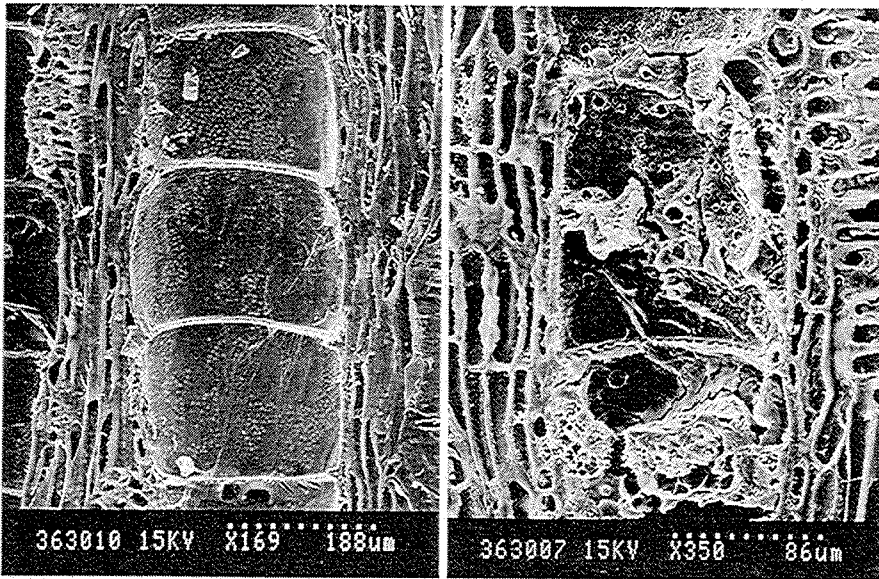


Bild 13. REM-Aufnahmen von Esche aus dem gesunden Gewebe (links) und aus dem Bereich einer Abschottungszone (rechts)

Fig. 13. SEM-photographs from an undecayed area of ash (left) and from a compartmentalization zone (right)

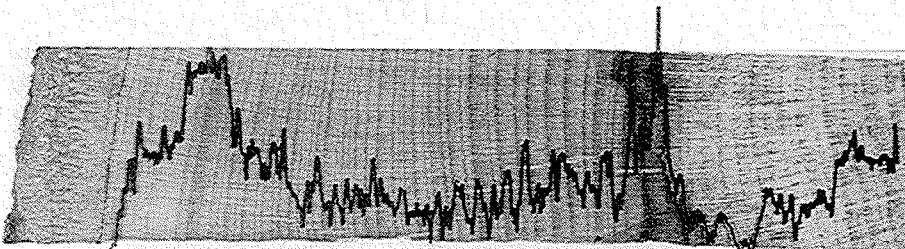


Bild 14. Oberfläche und Bohrwiderstandsprofil einer Buche mit Weißfäule

Fig. 14. Sample surface of beech decayed by white rot and drill-resistance profile superimposed

markierte die Rotkerngrenze, wo die Gefäße teilweise verthyllt und mit amorphen hellen Substanzen verstopft waren.

Die in den Abschottungszonen bzw. Grenzschichten einer Verwundung oder Fäulnis gefundenen Strukturen wurden schon vielfach beschrieben. Verthyllungen kommen bei Baumarten mit ausreichend großen Tüpfeln zwischen Parenchymzellen und Gefäßen vor, wie z.B. bei Esche. Baumarten mit kleinen Tüpfeln, wie Birke oder Pappel, lagern dagegen gummiartige, amorphe Substanzen ein, die als 'plugs' die Gefäße und Fasern verschließen (Dujesiefken et al. 1989; Schmitt und Liese 1991). Diese Inhaltsstoffe sind im wesentlichen phenolischer Natur

(Hillis 1987). Daneben kommen auch andere organische und anorganische Einlagerungen vor (Grosser et al. 1991). Diese in Abhängigkeit von der Baumart chemisch unterschiedlichen Substanzen führen zu ähnlichen Reaktionen in den Bohrwiderstandsprofilen. Die gummiartigen Substanzen erhöhen die Dichte und üben vermutlich zusätzlich eine Bremswirkung auf die Bohrnadel aus, was dann zu einer Verstärkung des Dichtemaximums führt.

Bei der Interpretation von Bohrwiderstandsprofilen von Fäulen im Baum tritt die Frage auf, wie weit der Holzabbau fortgeschritten sein muß, bis eine deutliche Bohrwiderstands-

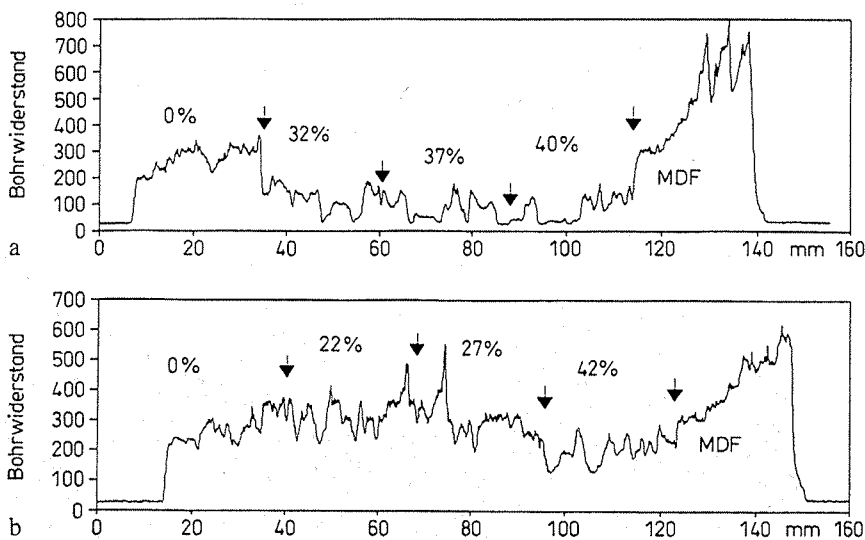


Bild 15 a, b. Bohrwiderstandsprofil von vier Kiefernklötzchen mit Masseverlusten wie angegeben; Pfeile zeigen, wo die Klötzchen aneinandergrenzen; MDF = Faserplatte; a Braunfäule, b Weißfäule
 Fig. 15 a, b. Drill-resistance profile of four pine samples of different weight losses as indicated; the arrows show where the samples were put together; MDF = medium density fibre board. a brown rot b white rot

erniedrigung eintritt und ob sich unterschiedliche Abbaugrade des Holzes aus dem Widerstandsprofil ablesen lassen. Die Bohrwiderstandsprofile von pilzbefallenen Proben zeigen eine auffällige Widerstandsabnahme bei einem Masseverlust von 32% bei Braunfäule und von über 40% bei Weißfäule (Bild 15). Nach Wilcox (1978, 1993) und Winandy und Morell (1993) tritt mitunter schon bei einem geringeren Masseverlust eine starke Abnahme der Holzfestigkeit auf. Schwarze und Fink (1994) fanden bereits bei Masseverlusten von 10% eine Erniedrigung des Bohrwiderstandes. Bei einem Masseverlust von nur 6% nimmt die Schlagbiegefestigkeit um 80% ab (Wilcox 1978), während die Rohdichte des Holzes nur wenig zurückgeht. Auch die statischen Holzfestigkeiten verändern sich bei einem Masseverlust zwischen 5 und 10% bereits deutlich. Die Frage, ob mit dem Bohrwiderstandsverfahren die Veränderung der Festigkeit oder aber der Rohdichte des Holzes erfaßt wird, bleibt hier vorerst unbeantwortet.

**4
 Schlußfolgerungen und Ausblick**

Mit Hilfe von Bohrwiderstandsmessungen ist es schnell und ohne viel Aufwand möglich, Informationen über den inneren Zustand und die Struktur von Bäumen und Holzbauteilen zu erhalten und damit die Restwandstärke eines Baumes oder Balkens mit Innenfäule zu messen.

Die Bohrwiderstandsprofile sind aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt. Verfahrensbedingte Faktoren sind (1) der langsame Anstieg des Bohrwiderstands zu Beginn der Bohrung und (2) der kontinuierliche Anstieg des Bohrwiderstands mit zunehmender Eindringtiefe gekoppelt mit (3) der Erhöhung des Leerlaufniveaus nach dem Austritt des Bohrers im Vergleich zum Leerlaufniveau zu Beginn der Bohrung. Diese drei Faktoren hängen nicht mit der Holzstruktur zusammen, werden aber durch Rohdichte und Holzfeuchte modifiziert.

Die Holzfeuchte ist ein bedeutender Einflußfaktor, da einerseits bei steigender Holzfeuchte der Bohrwiderstand zunimmt und andererseits seine Amplitude und der Anteil hochfrequenter Schwankung abnehmen. Bei Holzfeuchten über Fasersättigung werden lokale Dichteschwankungen abgeschwächt. Dies liegt u.a. darin begründet, daß das Frühholz im wassergesättigten Zustand einen höheren Wassergehalt aufweist als das Spätholz und somit der Dichteunterschied zwischen diesen beiden Zonen geringer wird. Ferner erfordert die Komprimierung des feuchten Bohrmehls aufgrund seiner höheren Dichte mehr Energie.

Die Vorschubgeschwindigkeit der Bohrnadel hat entscheidenden Einfluß auf die Ausprägung des Bohrtrends und den Anteil der hochfrequenten Schwankungen in den Bohrwiderstands-

profilen. Der Anteil hochfrequenter Schwankung in einem Bohrwiderstandsprofil ist umso größer, je höher die Vorschubgeschwindigkeit der Bohrnadel ist. Zugleich ist der Bohrtrend wesentlich geringer ausgeprägt. Die neueste Version des Bohrwiderstandsmeßgerätes erlaubt es, auch Holzarten hoher Rohdichte mit 6-fach höherem Vorschub als bisher zu bohren.

Die hochfrequenten Schwankungen im Bohrwiderstandsprofil reflektieren die baumartenspezifische Holzstruktur. Durch Vergleich mit bildanalytisch ermittelten Holz dichteprofilen konnte nachgewiesen werden, daß die Bohrwiderstandsmessung zu einem hochauflösenden Dichteprofil führt. Die Bildanalyseprofile ermöglichten bei allen Baumarten eine Auflösung aller Jahrringgrenzen. Im Bohrwiderstandsprofil sind die Dichteminima und -maxima weniger deutlich abgebildet. Die Bohrwiderstandsprofile der trocken gebohrten Proben waren dem Bildanalyseprofil ähnlicher.

Eine Jahrringerkennung allein anhand der Bohrwiderstandsprofile ist in Abhängigkeit von der Baumart unterschiedlich gut möglich. Bei ringporigen Baumarten zeigen die auffälligen Dichteminima deutlich eine Jahrringgrenze an. Schwierigkeiten bei der Jahrringerkennung ergeben sich hier nur im Bereich extrem enger Jahrringe und in Marknähe. Unterschiede in der Jahrringerkennung bestehen hingegen bei den zerstreutporigen Baumarten. Bei Buche und Pappel sind breite Jahrringe sicher, schmale Jahrringe aber nicht erkennbar. Intraannuelle Dichteschwankungen, sog. falsche Jahrringe, können zu Fehlern führen. Problematisch ist die Interpretation des Bohrwiderstandsprofils bei Hainbuche. Das Bohrwiderstandsprofil könnte zur Identifizierung von Jahrringgrenzen verleiten, tatsächlich spiegeln die hochfrequenten Schwankungen hier nur selten die Jahrringstruktur wider.

Eine lückenlose und sichere Erfassung aller Jahrringgrenzen ist anhand der Bohrwiderstandsprofile unmöglich. Jedoch kann auf das allgemeine Zuwachsniveau eines Baumes sowie auf Wechsel in der Wachstumsaktivität über das Baumleben geschlossen werden. Für dendroökologische Untersuchungen sind Bohrkern vorzuziehen.

Es wäre wünschenswert, dem Anwender eines Bohrwiderstandsmeßgerätes einen Katalog an die Hand zu geben, der (1) Informationen zur Struktur der wichtigsten Baumarten enthält, (2) darauf hinweist, ob eher Dichteminima oder -maxima eine Jahrringgrenze anzeigen, und (3) Probleme (z.B. das Vorkommen falscher Jahrringe) bei der Interpretation der Bohrwiderstandsprofile erläutert.

Die orientierenden Untersuchungen an pathologisch veränderten Hölzern haben die Ursachen der Dichtespitzen im Bohrwiderstandsprofil im Randbereich von Fäulen aufgeklärt.

Sie beschreiben entweder eine Verthyllung der Gefäße und/oder die Einlagerung gummiartiger oder harter amorpher Substanzen.

Eine Braunfäule führt im Vergleich zur Weißfäule bereits bei einem geringeren Masseverlust zu einer Bohrwiderstandsabnahme. Das Erkennen von verschiedenen Befallsstadien anhand des Bohrwiderstandsprofils ist wünschenswert. Ferner stehen weitere Untersuchungen über Abschottungszonen verschiedener Laubbaumarten im Bereich von Fäulen, Verletzungen und fakultativem Kernholz aus.

5

Literatur

- Bemmann, A.; Klingler, L. 1993: Erkennung von Fäulen im Innern stehender Bäume. Holz Roh- Werkstoff 51: 291-293
- Butin, H. 1989: Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Diagnose - Biologie Bekämpfung. Georg Thieme Verl, Hannover, 216 S
- Dujesiefken, D.; Ebenritter, S.; Liese, W. 1989: Wundreaktionen im Holzgewebe bei Birke, Buche und Linde. Holz Roh- Werkstoff 47: 495-500
- Fortuin, G.; Frühwald, A. 1987: Der Schnittleistungsbedarf beim Fräsen von Holz. Holz und Kunststoffverarb. 22: 600-605
- Görlacher, R.; Hättich, R. 1990: Untersuchung von altem Konstruktionsholz: Die Bohrwiderstandsmessung. Bauen mit Holz 92: 455-459
- Grosser, D.; Lesnino, G.; Schulz, H. 1991: Histologische Untersuchungen über das Schutzholz einheimischer Laubbäume. Holz Roh- Werkstoff 49: 65-73
- Hillis, W. E. 1987: Heartwood and tree exudates. Springer Verl, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 268 S
- Kollmann, F.; 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer Verl, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1050 S
- Le Naour, F. 1988: Une méthode de reconnaissance mécanique du bois: Le percage. Thèse Univ. Bordeaux, 79 S
- Pahlitzsch, G.; Mehrdorf, J. 1962: Einfluß von Spannungsdicke und Holzfeuchte auf die Erzeugung von Holzspänen. Holz Roh- Werkstoff 20: 314-322
- Rinn, F. 1988: Eine neue Methode zur Messung von Baumringparametern. Dipl.-Arb. Univ. Heidelberg, 59 S. + Anh
- Rinn, F. 1992: Chancen und Grenzen bei der Untersuchung von Konstruktionshölzern mit der Bohrwiderstandsmethode. Bauen mit Holz 94: 745-748
- Rinn, F.; Schweingruber, F. H.; Schär, E. 1995: RESISTOGRAPH drill resistance profiles and high-resolution x-ray density charts of different species of wood - a comparative evaluation. Holzforschung 49, im Druck
- Saß, U.; Eckstein, D. 1994: Preparation of large thin sections and surfaces of wood for automatic image analysis. Holzforschung 48: 117-118
- Schmitt, U.; Liese, W. 1991: Suberin in wound reaction parenchyma of birch xylem (*Betula pendula* Roth.): An electron microscopic study. Holzforschung 45: 313-315
- Schwarze, F. W. M. R.; Fink, S. 1994: Ermittlung der Holzersetzung am lebenden Baum. Neue Landschaft 39: 182-193
- Wilcox, W. W. 1978: Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. Wood and Fiber 9: 252-257
- Wilcox, W. W. 1993: Comparative morphology of early stages of brown-rot wood decay. IAWA Journal 14: 127-138
- Winandy, J. E.; Morell, J. J. 1993: Relationship between incipient decay, strength, and chemical composition of douglas-fir heartwood. Wood and Fiber Sci 25: 278-288
- Zobel, B. J.; van Buijtenen, J. P. 1989: Wood variation - its causes and control. Springer Verl, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, 363 S