

Jahrringe als Archive für interdisziplinäre Umweltforschung

PAOLO CHERUBINI, HOLGER GÄRTNER, JAN ESPER, MICHÈLE KAENNEL DOBBERTIN, KLAUS FELIX KAISER, ANDREAS RIGLING, KERSTIN TREYDTE, NIKLAUS E. ZIMMERMANN und OTTO ULRICH BRÄKER

Keywords: Tree-ring research; dendrochronology; methods; WSL; Birmensdorf. FDK 111.83 : 551 : 561.24 : 945.4 : UDK 551.593

CHERUBINI, P.; GÄRTNER, H.; ESPER, J.; KAENNEL DOBBERTIN, M.; KAISER, K.F.; RIGLING, A.; TREYDTE, K.; ZIMMERMANN, N.E.; BRÄKER, O. U.: Jahrringe als Archive für interdisziplinäre Umweltforschung

Die Dendrochronologie

Die Dendrochronologie (aus dem Altgriechischen: δένδρον = Baum, χρόνος = Zeit und λογος = Lehre) beschäftigt sich mit dem Studium des Baumwachstums und dessen Beziehungen zur Umwelt in Abhängigkeit von Raum und Zeit. Entscheidend für viele wissenschaftliche Forschungsfragen ist die Datierung, d.h. die exakte Zuordnung eines jeden Baumringes zu einem bestimmten Kalenderjahr. Die Überprüfung der korrekten Datierung eines jeden Jahrringes erfolgt durch das «Crossdating» (≈ Synchronisieren). Nur Jahrringserien, die synchronisiert wurden, können als dendrochronologische Datenserien angesehen werden. Die Crossdating-Methode unterscheidet die Dendrochronologie von Jahrringzählungen oder Baumringmessungen wie sie beispielsweise für forstliche, wachstumskundliche Zwecke angewandt werden.

Zur Geschichte der Dendrochronologie

Ausgehend von Leonardo da Vinci (1452 bis 1519) bis hin zu den Holzanatomen und botanischen Schulen des 19. Jahrhunderts in Mitteleuropa wurde die Jahrringforschung massgeblich nach (gemessen an heutigen Massstäben) ökologischen Gesichtspunkten betrieben (z.B. HARTIG 1869, 1882). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelte der Astronom Andrew E. Douglass (1867 bis 1962) in Arizona die Methode des Crossdatings, wodurch die jahrgenaue Datierung auch abgestorbener oder verbauter Stämme ermöglicht wurde (DOUGLASS 1937, 1941). Aber auch der in der Schweiz geborene Arthur Freiherr von Seckendorff-Gudent soll schon Ende des 19. Jahrhunderts mit einer vergleichbaren Technik das exakte Alter von Bäumen bestimmt haben (WIMMER 2001). Die Methode des Crossdatings, unabhängig davon auf wen sie letztlich zurück zu führen ist, gilt als Grundstein für die Wissenschaft der Dendrochronologie und eröffnete zunächst neue Perspektiven in der Archäologie (DOUGLASS 1921; MCGRAW 2003).

Douglass bohrte darüber hinaus als Erster Bäume (*Pinus ponderosa* Dougl.) an, um anhand der Jahrringe Informationen über die vergangenen klimatischen Bedingungen und dadurch über die Sonnenaktivität zu gewinnen. Darauf aufbauend wurde die Dendrochronologie immer häufiger für klimatische Zwecke genutzt, indem sie sich als eine der Hauptquellen für klimatische Proxidata (Stellvertreterdaten) etablierte (HUGHES 2002).

In den letzten Jahrzehnten wurden Jahrringanalysen wieder vermehrt in ökologischen Studien angewandt (SCHWEINGRUBER 1988, 1996) (Abbildung 1). Ein Beispiel sind die zahlreichen Untersuchungen über die Rolle des Feuers in südwest-amerikanischen Waldökosystemen (SWETNAM 1993), die wiederum ein tieferes Verständnis für die Rolle ökologischer Störfaktoren ermöglichten. Diese Kenntnisse erlaubten die Entwicklung von neuen waldbaulichen Strategien in vielen verschiedenen Waldökosystemen (z.B. BERGERON & HARVEY 1997).

Am Ende des 20. Jahrhunderts hatte sich die Dendrochronologie als weltweit anerkannte Wissenschaft etabliert. Dendrochronologische Methoden, Labortechniken, Messgeräte und Software wurden standardisiert (FRITTS 1976; COOK &

KAIRIUKSTIS 1990) und werden weitgehend in der angewandten Forschung genutzt, z.B. um Kohlenstoffspeicherungskapazität verschiedener Bestände zu schätzen (BASCETTO *et al.* 2004). Die Anwendung solcher Analysen fördert ein besseres Verständnis der räumlichen und zeitlichen Entwicklung vieler geophysikalischer und ökologischer Prozesse und Phänomene. Sie kann zudem bei der Lösung verschiedenartiger Probleme helfen. So können beispielsweise Strategien im Wassermanagement entwickelt werden, um Desertifikationsprozesse zu bekämpfen (TOUCHAN *et al.* 1999; D'ARRIGO & CULLEN 2001; CHERUBINI *et al.* 2003).

Diese Arbeit zeigt den Stand der Jahrringforschung an der WSL in Birmensdorf: Was wird an der WSL mittels Dendrochronologie erforscht? Wie und mit welchen Zielen wird gearbeitet? Welche Ergebnisse wurden erzielt?

Material

Standortauswahl

Das Jahrringwachstum ist das Produkt sämtlicher am Wuchsort wirkenden Standortfaktoren. Da diese Standortfaktoren über die Jahre gesehen nicht konstant sind, variieren auch die Jahrringbreiten entsprechend. Je nach Standort und Zusammensetzung der einwirkenden Faktoren ist eine eindeutige Zuordnung der Wachstumsbeeinflussung folglich oft nicht möglich. Ein durchdachtes, problemorientiertes Beprobungsdesign ist daher Voraussetzung für eine erfolgreiche jahrringanalytische Auswertung. Je nach Fragestellung sind Beprobungen a) von Extremstandorten mit bekannter, einschätzbarer Faktorenkombination (z.B. RIGLING *et al.* 2002), b) entlang von ausgeprägten, überprüfbaren Standortgradienten (z.B. KIENAST *et al.* 1987), c) unter Miteinbezug von Kontrollflächen (z.B. TOGNETTI *et al.* 2000; RIGLING *et al.* 2003) und c) mit einer genügend hohen Anzahl von Wiederholungen erfolgreich,

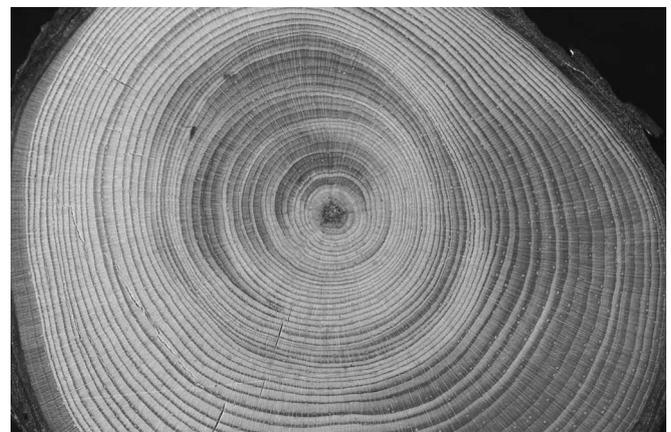


Abbildung 1: Jahrringe einer Legföhre (*Pinus mugo* Turra) auf der LWF-Fläche (Langfristige Waldkösystern-Forschung) im Schweizer Nationalpark.

Anhand von Wachstumsverläufen ist es gelungen, die Reaktion der Bäume auf verschiedene Pilzbefälle zu rekonstruieren (CHERUBINI *et al.* 2002). Jahrringe dienen so als natürliche Archive der Lebensgeschichte der Bäume, um Informationen über vergangene Umweltbedingungen zu gewinnen (Foto: Marcus Schaub).

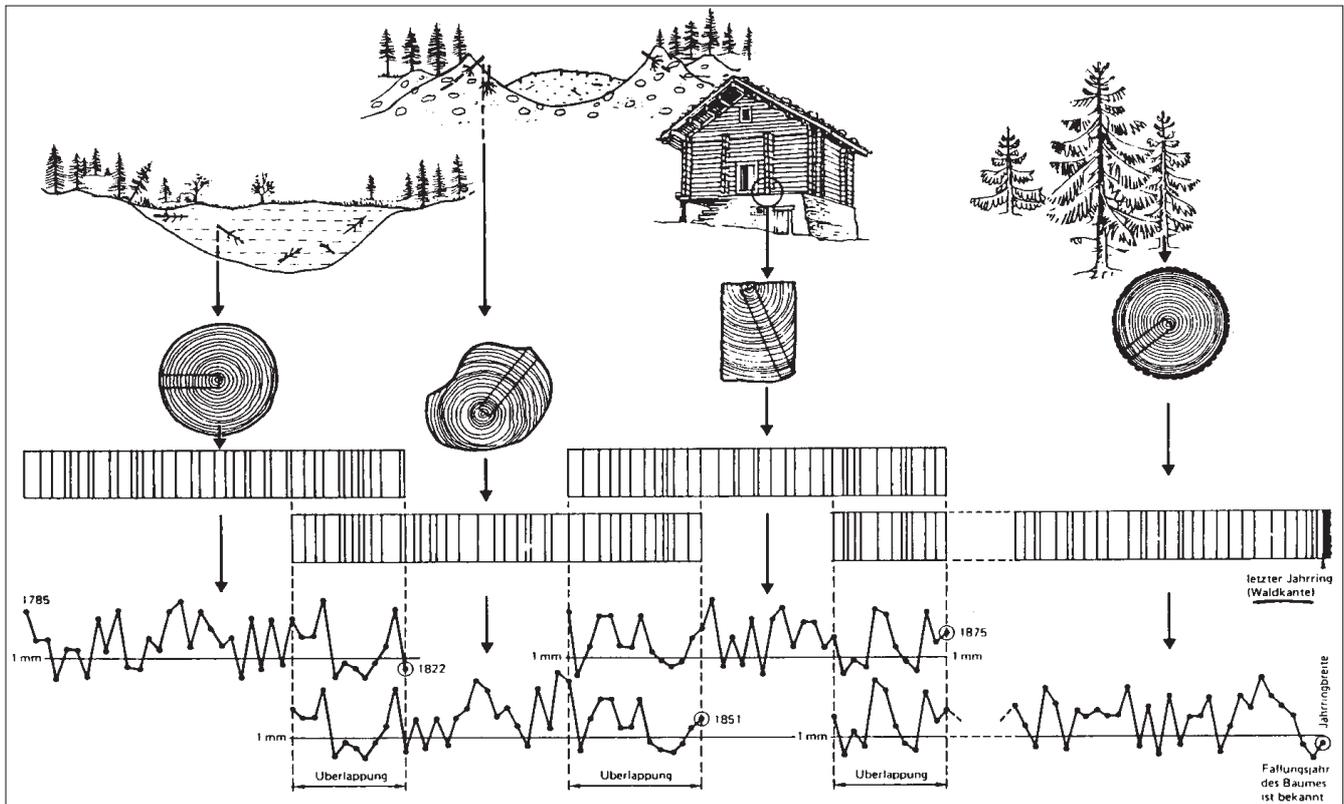


Abbildung 2: Crossdating. Schematische Darstellung des Synchronisierens.

denn sie erlauben eine eindeutige Interpretation der Resultate. Jeder Jahrringbeprobung muss eine präzise, der Fragestellung angepasste Standortsansprache vorangehen.

Zusätzlich ist für die Interpretation von Jahrringserien eine detaillierte Beschreibung jedes beprobten Baumes von Vorteil, welche im Falle von Schwierigkeiten bei der Messung oder Interpretation herangezogen werden kann. So kann es entscheidend sein zu wissen, ob der beprobte Baum z.B. eine Stammverletzung aufwies oder ob der Nachbarbaum vor kurzem abgestorben ist.

Probenmaterial

Um Jahrringanalysen durchzuführen, werden entweder Stammscheiben oder Bohrkerne genutzt. Die Entnahme von Stammscheiben bietet die besten Analysemöglichkeiten, weil man mit einem Blick alle Radien des Stammes überblicken kann. Dies setzt jedoch voraus, dass der Baum für die Analyse gefällt werden muss. Bohrkerne hingegen können ohne grosse Beschädigungen entnommen werden. Die angebohrten Bäume werden bei diesem Verfahren nur minimal beeinflusst; sie werden zwar beschädigt, aber meistens überstehen die Bäume diese Verletzungen problemlos. Es gibt keine Vorzugsaison, um die Bäume anzubohren, da sie während der Vegetationszeit schnell die Verletzung überwallen, und während des Winters werden sie weniger durch Pathogene beeinflusst.

Abgesehen von lebenden Bäumen werden auch fossile und subfossile Hölzer sowie Balken und andere Konstruktionshölzer gebraucht, um lange Chronologien zu erstellen (Abbildung 2). Von fossilen Bäumen werden normalerweise Stammscheiben geschnitten. Dabei wird je nach Erhaltungszustand des Materials ein möglichst vollständiger Querschnitt (inklusive Waldkante) mit minimalen Störungen durch die Wurzelansätze genommen (SCHAUB 2003; KAISER 1993).

Der Jahrring

Wenn man einen Baum fällt, kann man im Stammquerschnitt Ringe erkennen. Solche Ringe werden in gemässigten Klima-

regionen, die sich durch einen jahreszeitlich bedingten Unterbruch der Vegetationsperiode auszeichnen, jährlich gebildet, weshalb sie Jahrringe genannt werden. Sie entstehen durch die unterschiedlichen Holzzellen, die im Verlauf einer Vegetationsperiode von dem den Stamm umgebenden Kambium gebildet werden.

Jahrringstruktur

Die Zellstruktur der Nadelbäume zeigt einen relativ einheitlichen Aufbau. Sie besitzen ausschliesslich Tracheiden, die sich lediglich in Form und Funktion unterscheiden (Abbildung 3). Zu Beginn der Vegetationsperiode werden dünnwandige, grosslumige Zellen gebildet (Frühholz), die in der Lage sind, grössere Mengen an Wasser und Nährstoffen zu transportieren, im Sommer bis zum Ende der Vegetationsperiode werden dagegen abgeflachte, kleinumige Zellen mit dickeren Zellwänden gebildet (Spätholz), die eher eine stabilisierende Funktion haben. Die stärkere Lignifizierung der Zellwände der Spätholzzellen lässt diese auch dunkler erscheinen als die Frühholzzellen. Die unterschiedliche Holzdicke, die dadurch entsteht, erlaubt die einfache Erkennung der Zuwachsschichten als Ringe.

Die Zellstruktur des Jahrringes der Laubhölzer unterscheidet sich im Allgemeinen dadurch von den Nadelhölzern, dass neben den Tracheiden grosse Gefässzellen ausgebildet werden. Dadurch ergibt sich eine höhere Variabilität in der Jahrringstruktur (SCHWEINGRUBER 2001).

Methoden

Jahrringbreitenmessung

Die Jahrringbreite ist neben dem Baumalter (durch die Anzahl der Ringe ermittelt) der wichtigste Messparameter der Dendrochronologie.

Die Grundlage für eine Analyse der Jahrringbreite ist eine zuverlässige, exakte und effiziente Datenvermessung und -aufnahme. Dazu müssen die zu messenden Bohrkerne oder

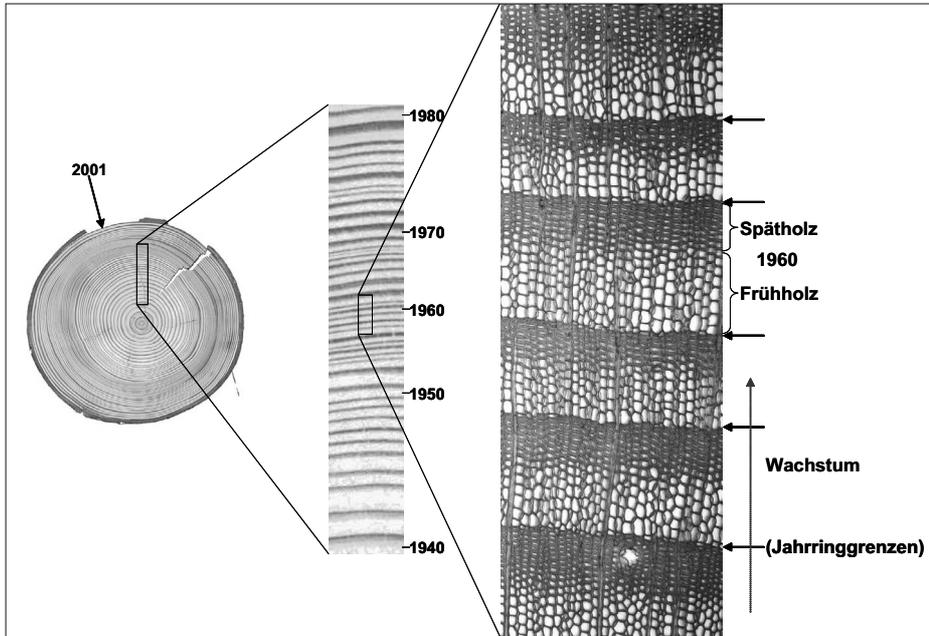


Abbildung 3: Darstellung der Jahrringstruktur eines Nadelbaumes.

Links ein Stamm im Querschnitt mit erkennbaren konzentrischen Jahrringen. Die vergrößerte Darstellung der Jahrringabfolge der Jahre 1940 bis 1980 verdeutlicht die Unterteilung der Jahrringe in einen hellen (Frühholz-) und einen dunklen (Spätholz-)Bereich. Der rechts abgebildete Dünnschnitt der Jahrringe 1957 bis 1962 zeigt die unterschiedliche Ausprägung der Früh- und Spätholzzellen.

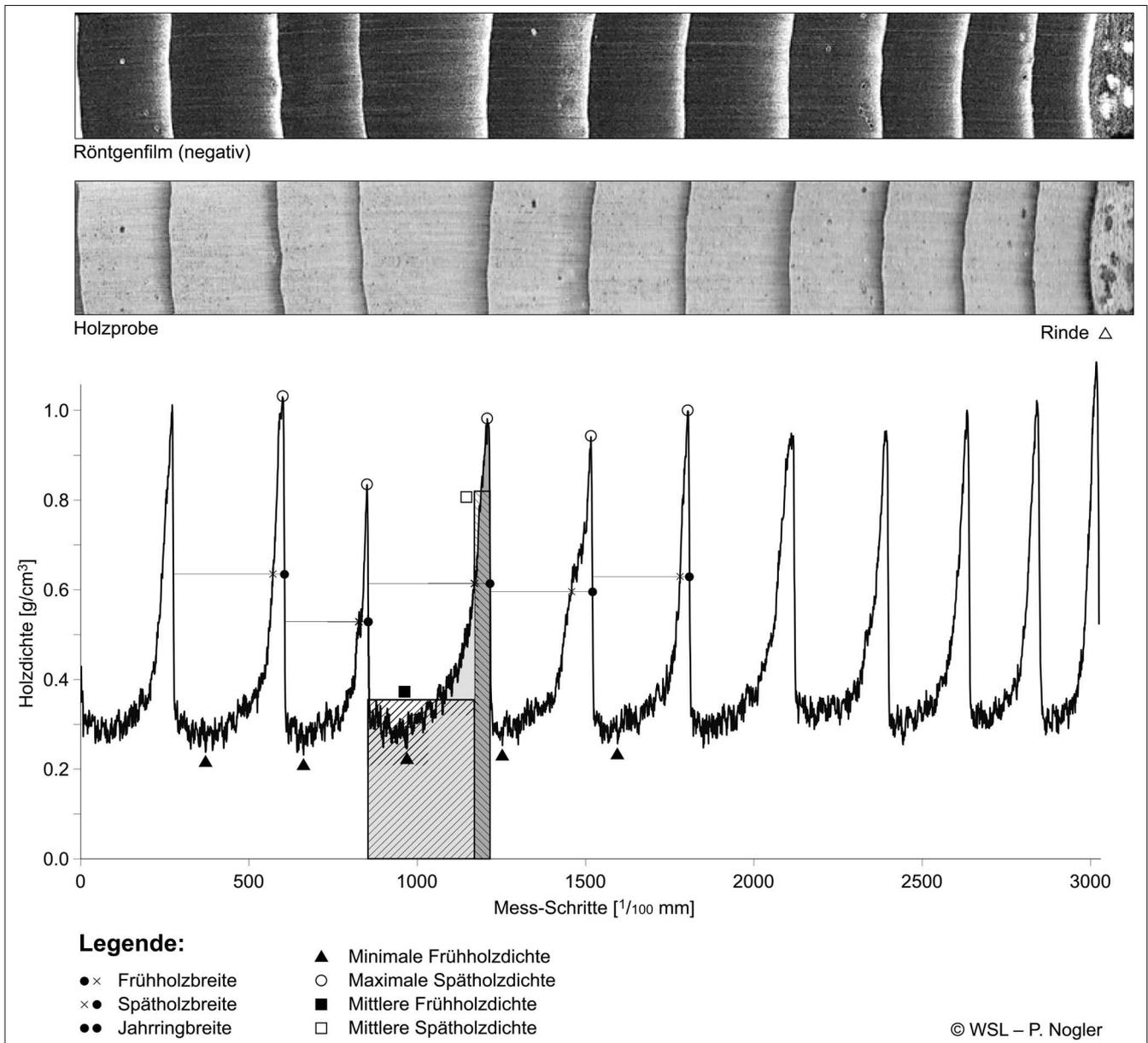


Abbildung 4: Prinzip der Radiodensitometrie.

Dargestellt sind die Holzprobe (Mitte), die Röntgenaufnahme (oben) und das daran gemessene Dichteprofil (unten). Das Dichteprofil gibt den Lichtdurchlass des Röntgenfilms wieder. Mit Hilfe eines Eichkeils werden diese Messungen dann in g/cm³ umgerechnet (Abbildung: Padruot Nogler).

Stammscheiben auf einer Bandschleifmaschine in verschiedenen Durchgängen mit zunehmend feinerer Körnung angeschliffen werden damit die Jahrringgrenzen optimal sichtbar werden. Dies ist vor allem bei Holz von Extremstandorten, welches häufig sehr enge Jahrringe aufweist, entscheidend. Die geschliffenen Proben werden anschliessend unter einer Stereolupe mittels einer Jahrringmessanlage auf 1/100 mm Genauigkeit vermessen, im Computer erfasst und mit einer Spezialsoftware (z.B. TSAP, Rinntech, Heidelberg, Deutschland) weiterverarbeitet.

Jahrringdichtemessung

Neben der Jahrringbreite kann auch die Dichte von Jahrringen messtechnisch erfasst werden. Dazu werden an der WSL mit einer Doppelkreissäge 1,2 mm dünne Holzblättchen aus Bohrkernen bzw. Scheiben entnommen. Dabei ist zu beachten, dass die Sägerichtung exakt rechtwinklig zur Faserichtung des Stammholzes ist. Je nach Baumart werden zuvor Inhaltstoffe, wie beispielsweise Harz, von den Holzproben extrahiert. Die Holzblättchen definierter Dicke werden dann geröntgt, und die Röntgenfilme analysiert (Abbildung 4). Schweres bzw. dichtes (Spät-)Holz erscheint auf diesen Filmen hell und leichtes (Früh-)Holz dunkel. Der Lichtdurchlass durch die Filme kann nach Eichung der entsprechenden Apparatur gemessen und in g/cm^3 (Dichte) ausgegeben werden. Es entstehen Kurven, die mit einer Auflösung von bis zu 10 μm die Dichteprofile von Holz aufzeichnen. An diesen werden die Übergänge vom Spätholz eines Jahrrings (maximale Dichte) zum Frühholz des Folgejahres (minimale Dichte) durch deutliche Sprünge ersichtlich. Die maximale Spätholzdichte ist beispielsweise ein Parameter, um an kalt-feuchten Standorten (z.B. obere Waldgrenze in den Alpen) die Temperaturen während der Vegetationsperiode aufzuzeichnen (BRIFFA *et al.* 1990).

Crossdating

Die Grundlage der Methode des Crossdatings ist die Erkenntnis, dass Bäume, die unter vergleichbaren Standortbedingungen wachsen (z.B. Klima und Konkurrenz), in ihrer relativen Jahrringabfolge übereinstimmen. Alle Bäume in der Schweiz, welche z.B. der extremen Sommertrockenheiten in den Jahren 1921, 1976 und 2003 ausgesetzt waren, haben in diesen Jahren einen schmalen Jahrring ausgebildet und umgekehrt in klimatisch vorteilhaften Jahren weisen sie breite Jahrringe auf. Das Übereinstimmen dieser Jahrringabfolgen erlaubt nun das Aneinanderfügen (Synchronisieren) der Wachstumskurven verschiedener Bäume, solange sie eine gemeinsame Wachstumsperiode aufweisen (Abbildung 2). Mit dieser Methode wurde unter anderem die süddeutsche Eichenchronologie erstellt (BECKER 1993), welche inzwischen überarbeitet über 10 340 Jahre vor heute zurückreicht (SPURK *et al.* 1998; FRIEDRICH *et al.* 1999) und anhand derer die jahrgenaue Datierung auch abgestorbener oder verbauter Stämme möglich wurde. Die absolute Chronologie konnte inzwischen unter anderem durch Funde aus den Hanglehmen des Üetlibergs von Zürich Wiedikon (KAISER 1993) und Gänziloh (KAISER & SCHAUB in diesem Heft) um mehr als zwei Jahrtausende bis 12 449 vor heute in die Vergangenheit erweitert werden (KAISER *et al.* 2003). Die Methode der Crossdatierung muss als Grundstein für die wissenschaftliche Methode der Dendrochronologie betrachtet werden.

Messung stabiler Isotope

Seit den 1990er Jahren nehmen Untersuchungen zu stabilen (also nicht radioaktiv zerfallenden) Isotopen in Jahrringen zu. Es werden hauptsächlich die Isotope der Elemente Kohlenstoff ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), Sauerstoff ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) und Wasserstoff (D/H) analysiert. Die Messungen der WSL laufen in Kooperation mit Iso-

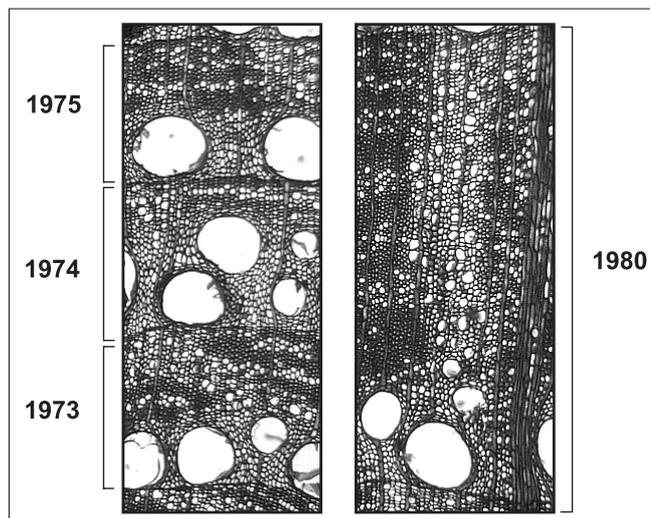


Abbildung 5: Unterschiedlicher Gewebeaufbau in Trockenjahren und in moderaten Jahren bei der Flumeiche. Mikroschnitte, 40-fach vergrössert.

In den relativ trockenen Jahren 1973 bis 1975 ist der Anteil des Leitungsgewebes am Jahrring verhältnismässig erhöht, im moderaten Jahr 1980 erniedrigt.

topenlabors wie dem Paul-Scherrer-Institut, dem physikalischen Institut der Universität Bern oder dem Forschungszentrum Jülich (Deutschland). Die Methode wird bei ökologischen und pflanzenphysiologischen Fragestellungen sowie bei der Erforschung von Stoffflüssen zwischen Umwelt und Ökosystemen, vor allem in Bezug auf Kohlenstoff- und Wasserkreisläufe eingesetzt (z.B. SAURER *et al.* 2003). Die Isotopenvariationen in Jahrringen bieten gegenüber den anderen methodischen Ansätzen den Vorteil, dass die Zahl der einflussnehmenden Faktoren reduziert ist. Sie geben Auskunft über Veränderungen in den Boden- und Luftfeuchtebedingungen am Standort (TREYDTE *et al.* 2001), aber auch über Temperaturschwankungen (SAURER *et al.* 2000) und Veränderungen im atmosphärischen Kohlendioxid. Die Reaktion auf bestimmte Umweltveränderungen ist meist bereits an mesischen Standorten ohne spezielle Limitierung durch einen dominanten Faktor offensichtlich. Saisonale Isotopenschwankungen innerhalb einzelner Jahrringe (intraannuelle Schwankungen) ermöglichen die weitere Unterscheidung zwischen äusseren, ökologischen und klimatischen Faktoren und internen pflanzenphysiologischen Prozessen (HELLE & SCHLESER 2004).

Bestimmung holzanatomischer Merkmale

Neben den erwähnten Messungen der Jahrringbreite und -dichte und der Isotope, wird an der WSL auch die Holzanatomie der Jahrringe für dendroökologische Untersuchungen genutzt. Während die «normale» Struktur eines Jahrrings (Form und Anordnung der Zellen) massgeblich zur Bestimmung von Holzarten verwendet wird (SCHWEINGRUBER 1990), liefern Abweichungen im Zellaufbau Informationen über umweltbedingte Einflüsse, die zu diesen Variationen der Normalstruktur führten. Störungen der Zellstruktur werden z.B. häufig im Bereich der Dendrogeomorphologie analysiert. Hier wird das Auftreten von z.B. Kallusgewebe, traumatischen Harzkanälen, Druck- und Zugholzzellen zur Datierung von geomorphologischen Prozessen genutzt (GÄRTNER *et al.* 2001). Weiterhin erlaubt die Analyse von holzanatomischen Veränderungen in Jahrringen freigelegter Wurzeln die jahrgenaue Rekonstruktion und Quantifizierung von Erosionsprozessen (GÄRTNER 2003a, b).

Auch in ökologischen Untersuchungen hilft die Holzanatomie. So wurde bei einer Studie an Föhren (*Pinus sylvestris* L.)

und Flaumeichen (*Quercus pubescens* Willd.) auf einem Trockenstandort im Wallis die Reaktion auf Trockenstress zeitlich hoch aufgelöst auf Zellebene untersucht (EILMANN 2004). Die Zellen wurden anhand von Dünnschnitten mit Hilfe eines Bildanalyseprogramms vermessen (Abbildung 5). In Trockenjahren bildete die Föhre deutlich weniger Tracheiden. Die Flaumeiche reagierte analog mit einer Reduktion der Frühholzgefässgrösse. In Trockenjahren wurde der relative Anteil des Leitungsgewebes im Vergleich zum Festigungsgewebe bei beiden Baumarten erhöht. Einige Ergebnisse stehen im Widerspruch mit anderen Untersuchungen, welche aber ausschliesslich auf moderaten Standorten durchgeführt wurden. Auf den extremen Walliser Trockenstandorten dürfte die Reaktion auf holzanatomischer Ebene in Trockenjahren zusätzlich durch die äusserst geringe Produktivität von nur wenigen Zellen beeinflusst werden (EILMANN 2004). Die ökologische Interpretation der Holzanatomie (Funktionalität der Zellen) stellt ein wichtiges Bindeglied zwischen der Jahrringforschung und der Ökophysiologie dar.

Anwendung der Jahrringinformationen

Gegenwärtig werden die durch Jahrringuntersuchungen gewonnenen Informationen in den verschiedensten Gebieten angewandt, von den Rechtswissenschaften (z.B. Objektdatierungen in Kriminalfällen) bis hin zur Astrophysik (z.B. Datierung von Meteoriteneinschlägen). In erster Linie werden Jahrringinformationen jedoch in der Archäologie (KUNIHOLM 2002), Klimatologie (FRITTS 1976; HUGHES 2002; ESPER *et al.* 2002, 2004 in diesem Heft) und zunehmend im Bereich geowissenschaftlicher Fragestellungen, z.B. Geomorphologie (STRUNK 1995; BAUMANN & KAISER 1999; GÄRTNER *et al.* 2003, 2004 in diesem Heft; KAISER *et al.* 2003; BEBI *et al.* in diesem Heft), und Waldwachstum (BRÄKER & RIGLING in diesem Heft) und Ökologie (RIGLING *et al.* in diesem Heft; CONEDERA *et al.* in diesem Heft) eingesetzt. Die Bedeutung der fossilen Hölzer liegt im Aufbau langer Reihen, anhand welcher andere Holzfundate datiert werden können (KAISER & SCHAUB in diesem Heft). Dazu dienen Chronologien, wie z.B. die Süddeutsche Eichenchronologie (SPURK *et al.* 1998). Anhand dieser langen Zeitreihen liess sich zudem die ¹⁴C-Zerfallskurve kalibrieren (Suess 1967; STUIVER *et al.* 1998).

Eine weitere Anwendung besteht im Testen oder Kalibrieren von numerischen Modellen. Dabei stehen zwei Gruppen von Modellen im Vordergrund: erstens Waldsukzessions-Modelle (sogenannte Gap-Modelle) und zweitens Biomasse-Modelle. Im ersten Fall werden im Modell jährliche Zuwachsraten von Einzelbäumen in einem Waldbestand simuliert (z.B. BUGMANN 1994). Damit entspricht die modellierte Zielgrösse dem gemessenen Jahrring. Allerdings werden in einem Gap-Modell mehrere Einzelbestände rechnerisch gemittelt. Ein sinnvoller Vergleich kann daher nur mit einer Bestandserhebung von Jahrringproben vorgenommen werden. Der Vergleich mit Einzelkurven oder mit Chronologien, welche nur auf ausgewachsenen Bäumen bestehen, macht wenig Sinn. In der zweiten angesprochenen Modellgruppe werden vor allem Kohlenstoffkreisläufe simuliert (nebst Wasser- und Stickstoff). Ein Beispiel dafür stellt das Modell Biome-BGC dar (THORNTON 1998; CHURKINA & RUNNING 2000; THORNTON *et al.* 2002). Die wesentlichen physiologischen Prozesse (etwa Photosynthese, Stomata-Regulation, C-Verteilung im Baum, Abbau von Streu), werden in täglichen Schritten simuliert. Als Jahresbilanz resultiert die Nettozunahme von Kohlenstoff für einen Waldbestand als ganzes, oder aufgeteilt in die Pools Wurzeln, Stamm/Äste sowie Blätter oder Nadeln (wobei die Blätter nur saisonal Biomasse aufweisen). Auch hier sind Jahrringdaten wertvolle Testgrössen, zumindest zum Testen der Simulation oberirdischer Zuwachsdaten. Verglichen mit Waldinventuren

haben Jahrringe den Vorteil der jährlichen Auflösung des Wachstumsverlaufes.

Zukunft der Dendrochronologie

Jahrringe können detaillierte Auskunft über Waldproduktivität oder natürliche Störungen und Risiken, z.B. Auswirkungen von Schädlingen (CHERUBINI *et al.* 2002) oder geomorphologischen Prozessen (GÄRTNER *et al.* in diesem Heft) geben, aber auch Umwelteffekte anthropogener Einflüsse sind ein Teilbereich dendroökologischer Forschung geworden. Wenn man die Publikationen in der Dendro-Literatur-Datenbank¹ analysiert (KAENNEL DOBBERTIN & GRISSINO-MAYER 2004a, b in diesem Heft), erkennt man schnell, dass die meisten neueren Publikationen ökologische Fragen betreffen. Das zeigt das starke Interesse an der Verwendung von Jahrringanalysen in ökologischen Studien. Auch die meisten Anfragen an das International Tree Ring Data Bank Forum auf dem Web² zielen auf ökologische Fragestellungen ab.

Eines der neuen, viel versprechenden wissenschaftlichen Felder, die es auszuweiten gilt, sind Untersuchungen von Isotopen in Jahrringen (SAURER *et al.* 2000; TREYDTE *et al.* 2001, 2004 in diesem Heft; REBETZ *et al.* 2003; SAURER *et al.* 2003; TREYDTE 2003). Bei der Verbindung von Dendrochronologie und Ökophysiologie geben die Jahrringisotope wichtige Auskünfte über die Baumphysiologie, Klimabedingungen und ihre Zusammenhänge. Die kombinierte Anwendung von stabilen Isotopen und Jahrringbreiten wird ein besseres Verständnis der Waldökosystemreaktionen auf Umweltstressfaktoren ermöglichen.

Aber nicht nur die Jahrringe im Stamm sind Gegenstand dendrochronologischer Untersuchungen. Neuere Arbeiten im Bereich der Dendrogeomorphologie stellen die Jahrringe der Wurzeln ins Zentrum ihrer Untersuchungen, wodurch eine genauere Rekonstruktion erosiver Prozesse ermöglicht wird (GÄRTNER 2003a, b). In vielen Bereichen dendroökologischer Fragestellungen werden darüber hinaus vermehrt holzanatomische Analysen durchgeführt um detailliertere Erkenntnisse über die Auswirkung von Umweltfaktoren auf die Jahrringentwicklung zu erhalten (GÄRTNER *et al.* 2001; CHERUBINI *et al.* 2003).

Die Dendrochronologie hat sich also in den vergangenen Jahrzehnten weit über eine Datierungsmethode hinaus entwickelt. Unter der Leitung von Fritz Hans Schweingruber und Otto Ulrich Bräker wurde seit Ende der 1970er Jahre die Jahrringforschung an der WSL aufgebaut und stets weiterentwickelt. Die WSL ist gegenwärtig europaweit das Hauptausbildungszentrum im Bereich der Jahrringforschung und dient verschiedenen Universitäten, vor allem der Schweiz, Deutschland und Italien, als Anlaufstelle für die Ausbildung junger Forscher. Ein wichtiges Instrument der Nachwuchsausbildung ist die von Schweingruber ins Leben gerufene internationale dendroökologische Feldwoche, welche inzwischen jährlich durch die Mitarbeiter des Dendronetzwerkes durchgeführt wird.

Wie sieht die Zukunft der Jahrringforschung aus? Jahrringanalysen werden in den verschiedensten Forschungsbereichen (z.B. Wald- und Landschaftsökologie, Klimatologie, Geomorphologie) erfolgreich angewandt, neue Methoden werden entwickelt und an aktuelle Fragestellungen angepasst. Die Jahrringanalyse hat sich also zu einer Querschnittsdisziplin entwickelt. Die Jahrringe als jahrgenauer Zeitmassstab etablieren sich.

¹ Bibliography of Dendrochronology, verwaltet von Henri Grissino-Mayer an der University of Tennessee in Knoxville (U.S.A.) und Michèle Kaennel Dobbertin an der WSL, <http://www01.wsl.ch/dendrobiblio/> (28. April 2004).

² ITRDB Dendrochronology Forum: itrdbrfor@listserv.arizona.edu.

Zusammenfassung

Dieser Aufsatz beschreibt die Tätigkeiten im Bereich der Jahrringforschung an der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL (Birmensdorf, Schweiz). Neben einer kurzen Darstellung der Geschichte der Dendrochronologie wird auf die aktuell an der WSL angewandten Methoden der Jahrringbreiten- und Dichtemessung, des Crossdatings und damit verbundener Datierungen und Chronologiebildungen, der Messung stabiler Isotope und der Holzanatomie eingegangen.

Summary

Annual rings as an archive for interdisciplinary environmental research

The paper describes research in dendrochronological fields that was carried out at the Swiss Federal Research Institute WSL (Birmensdorf, Switzerland). After a short history of dendrochronology, we describe the applied materials and methods used, namely ring-width and wood density measurements, crossdating, stable isotopes measurement and wood anatomy.

Résumé

Les cernes en tant qu'éléments d'archive pour la recherche environnementale interdisciplinaire

Cet article décrit les travaux de recherche que l'Institut fédéral de recherches WSL (Birmensdorf, Suisse) a entrepris dans le domaine des cernes. Après un bref historique de la dendrochronologie, les méthodes appliquées (mesure de la largeur des cernes et de la densité, interdatation, mesure d'isotopes stables et anatomie du bois) sont présentées.

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Literatur

- BASCETTO, M.; CHERUBINI, P.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G. 2004: Tree rings from a European beech forest chronosequence are useful for detecting growth trends and carbon sequestration. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 481–492.
- BAUMANN, F.; KAISER, K.F. 1999: The Multetta Debris Fan, Eastern Swiss Alps: A 500-year Debris Flow Chronology. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 31 (2): 128–134.
- BECKER, B. 1993: An 11000-year German oak and pine chronology for radiocarbon calibration. *Radiocarbon* 35: 201–213.
- BERGERON, Y.; HARVEY, B. 1997: Basing silviculture on natural ecosystem dynamics: An approach applied to the southern boreal mixedwood forest of Quebec. *Forest Ecology and Management* 92, 1–3: 235–242.
- BRIFFA, K.R.; BARTHOLIN, T.S.; ECKSTEIN, D.; JONES, P.D.; KARLÉN, W.; SCHWEINGRUBER, F.H. 1990: A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature (London)* 346: 434–439.
- BUGMANN, H. 1994: On the ecology of mountainous forests in a changing climate: A simulation study. PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 258 pp.
- CHERUBINI, P.; FONTANA, G.; RIGLING, D.; DOBBERTIN, M.; BRANG, P.; INNES, J.L. 2002: Tree-life history prior to death: two fungal root pathogens affect tree-ring growth differently. *Journal of Ecology* 90, 5: 839–850.
- CHERUBINI, P.; GÄRTNER, B.L.; TOGNETTI, R.; BRÄKER, O.U.; SCHOCH, W.; INNES, J.L. 2003: Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from mediterranean climates. *Biological Reviews (Cambridge Philosophical Society)* 78, 1: 119–148.
- CHURKINA, G.; RUNNING, S. 2000: Investigating the balance between timber harvest and productivity of global coniferous forests under global change. *Climatic Change* 47, 1–2: 167–191.
- COOK, E.R.; KAIRIUKSTIS, L.A. (EDS.) 1990: *Methods of dendrochronology: applications in the environmental science*. International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 394 S.
- D'ARRIGO, R.; CULLEN, H.M. 2001: A 350-year (AD 1628–1980) reconstruction of Turkish precipitation. *Dendrochronologia* 19, 2: 169–177.
- DOUGLASS, A.E. 1921: Dating our prehistoric ruins. *Natural History* 21, 1: 27–30.
- DOUGLASS, A.E. 1937: *Tree rings and chronology*. University of Arizona Bulletin 8, 4, Physical Sciences Series 1.
- DOUGLASS, A.E. 1941: Crossdating in Dendrochronology. *Journal of Forestry* 39: 825–831.
- EILMANN, B. 2004: Wachstumsreaktion der Waldföhre (*Pinus sylvestris* L.) und der Flaumeiche (*Quercus pubescens* Willd.) auf klimatische Extremjahre – eine holzanatomische Studie. Diplomarbeit Universität Hamburg, 64 S.
- ESPER, J.; COOK, E.R.; SCHWEINGRUBER, F.H. 2002: Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 295: 2250–2253.
- FRIEDRICH, M.; KROMER, B.; SPURK, M.; HOFMANN, J.; KAISER, K.F. 1999: Paleo-environment and radiocarbon calibration as derived from Lateglacial/Early Holocene tree-ring chronologies. *Quaternary International* 61, 27–39.
- FRITTS, H.C. 1976: *Tree rings and climate*. Academic Press, London.
- GÄRTNER, H.; SCHWEINGRUBER, F.H.; DIKAU, R. 2001: Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia* 19: 1–11.
- GÄRTNER, H. 2003a: The applicability of roots in Dendrogeomorphology. In: Schleser, G.; Winiger, M.; Bräuning, A.; Gärtner, H., Helle, G.; Jansma, E.; Neuwirth, B.; Treydte, K. (eds.): *Trace – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology*, Vol. 1, p. 120–124.
- GÄRTNER, H. 2003b: Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse. *Dissertationes Botanicae*, Band 378, pp. 118.
- GÄRTNER, H.; STOFFEL, M.; LIÈVRE, I.; MONBARON, M. 2003: Tree ring analyses and detailed geomorphological mapping on a forested debris flow cone in Switzerland. In: Rickenmann, D.; Chen, C. (eds.): *Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. Vol. 1, p. 207–217.
- HARTIG, R. 1869: Das Aussetzen der Jahrringe bei unterdrückten Stämmen. In: *Zeitung des Forstlichen Jagdwesens* 1: 471–476.
- HARTIG, R. 1882: Ueber die Vertheilung der organischen Substanz, des Wassers und des Luftraumes in den Bäumen, und über die Ursache der Wasserbewegung in transpirierenden Pflanzen. Julius Springer, Berlin, 112 p.
- HELLE, G.; SCHLESER, G.H. 2004: Beyond CO₂-fixation by Rubisco – an interpretation of ¹³C/¹²C variations in tree rings from novel intra-seasonal studies on broad-leaf trees. *Plant, Cell and Environment* 27: 367–380.
- HUGHES, M.K. 2002: Dendrochronology in climatology – the state of the art. *Dendrochronologia* 20: 95–116.
- KAENNEL DOBBERTIN, M.; GRISSINO-MAYER, H.D. 2004a: The online bibliography of dendrochronology. *Dendrochronologia* 21, 2: 85–90.
- KAISER, K.F. 1993: Beiträge zur Klimageschichte vom späten Hochglazial bis ins frühe Holozän, rekonstruiert mit Jahrringen und Molluskenschalen aus verschiedenen Vereisungsgebieten. Habilitationsschrift. Universität Zürich. Ziegler Druck- und Verlags-AG, Winterthur, 203 S.
- KAISER, K.F.; MERKT, J.; EICHER, U. 2003: The Laachersee eruption (LSE) – an enormous catastrophe – the Laachersee tephra (LST) – an important Late glacial isopach. In: Wiedemann F.; Taborin Y. (eds.): *Geophysical and archaeological chronologies for the upper Palaeolithic*. Proceedings of the Int. Colloquium of Ravello 1994: 121–129.
- KIENAST, F.; SCHWEINGRUBER, F.H.; BRÄKER, O.U.; SCHÄR, E. 1987: Tree-ring studies on conifers along ecological gradients and the potential of single-year analyses. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 683–696.
- KUNIHMOLM, P.I. 2002: Archaeological dendrochronology. *Dendrochronologia* 20: 63–68.

- McGraw, D.J. 2003: Andrew Ellicott Douglass and the giant sequoias in the founding of dendrochronology. *Tree-Ring Research* 59: 21–27.
- REBETEZ, M.; SAURER, M.; CHERUBINI, P. 2003: To what extent can oxygen isotopes in tree rings and precipitation be used to reconstruct past atmospheric temperature? A case study. *Climatic Change* 61: 237–248.
- RIGLING, A.; BRÄKER, O.U.; SCHNEITER, G.; SCHWEINGRUBER, F.H. 2002: Intra-annual tree-ring parameters indicating differences in drought stress of *Pinus sylvestris* forests within the Erico-Pinion in the Valais (Switzerland). *Plant Ecology* 163: 105–121.
- RIGLING, A.; BRÜHLHART, H.; BRÄKER, O.U.; FORSTER, T.; SCHWEINGRUBER, F.H. 2003: Effects of irrigation on diameter growth and vertical resin duct production in *Pinus sylvestris* L. on dry sites in the central Alps, Switzerland. *Forest Ecology Management* 175: 285–296.
- SAURER, M.; CHERUBINI, P.; SIEGWOLF, R. 2000: Oxygen isotopes in tree rings of *Abies alba*: The climatic significance of interdecadal variations. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. D10, p. 12, 461–470.
- SAURER, M.; CHERUBINI, P.; BONANI, G.; SIEGWOLF, R. 2003: Tracing carbon uptake from a natural CO₂ spring into tree rings: an isotope approach. *Tree Physiology* 23: 997–1004.
- SCHAUB, M. 2003: Fossile Föhren der Uto-Autobahnbaustelle als Zeugen spätglazialer Klimaschwankungen. Diplomarbeit Giuz & WSL: 91 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1988: Tree rings. Basics and applications in dendrochronology. Reidel, Dordrecht.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1990: Anatomie europäischer Hölzer. – Anatomy of European woods. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Haupt, Bern, Stuttgart, 800 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1996: Tree rings and environment. Dendroecology. Paul Haupt, Bern.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 2001: Dendroökologische Holz Anatomie. Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Paul Haupt, Bern, 472 S.
- SPURK, M.; FRIEDRICH, M.; HOFMANN, J.; REMMELE, S.; FRENZEL, B.; LEUSCHNER, H.H.; KROMER, B. 1998: Revisions and extensions of the Hohenheim Oak and Pine Chronologies – new evidence about the timing of the Youbger Dryas/Preboreal Transition. *Radiocarbon* 40, 3: 1107–1116.
- STRUNK, H. 1995: Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Murfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung. Theorie und Forschung, Bd. 317. Geographie, Bd. I. Roderer, Regensburg, 196 S.
- STUIVER, M.; REIMER, P.J.; BARD, E.; BURR, G.S.; HUGHEN, K.A.; KROMER, B.; MCCORMAC, G.; V.D. PLICHT, J.; SPURK, M. 1998: Intcal98 radiocarbon age calibration. *Radiocarbon* 40, 3: 1041–1083.
- Suess, H.E. 1967: Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale 5200 BC to 1500 BC. In: Radioactive dating and methods of low-level counting. Vienna IAEA: 143–151.
- SWETNAM, T.W. 1993: Fire history and climate change in giant sequoia groves. *Science* 262: 885–889.
- THORNTON, P.E. 1998: Regional ecosystem simulation: combining surface- and satellite-based observations to study linkages between energy and mass budgets. Ph.D. Thesis, University of Montana, Missoula, MT, 200 pp.
- THORNTON, P.E.; LAW, B.E.; GHOLZ, H.L.; CLARK, K.L.; FALGE, E.; ELLSWORTH, D.S.; GOLSTEIN, A.H.; MONSON, R.K.; HOLLINGER, D.; FALK, M.; CHEN, J.; SPARKS, J.P. 2002: Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 1–4: 185–222.
- TOGNETTI, R.; CHERUBINI, P.; INNES, J.L. 2000: Comparative stem-growth rates of Mediterranean trees under background and naturally-enhanced ambient CO₂ concentrations. *New Phytologist* 146: 59–74.
- TOUCHAN, R.; MEKO, D.; HUGHES, M.K. 1999: A 396-year reconstruction of precipitation in Southern Jordan. *Journal of the American Water Resources Association* 35: 49–59.
- TREYDTE, K. 2003: Dendro-Isotope und Jahrringbreiten als Klimaproxy der letzten 1200 Jahre im Karakorumgebirge. Pakistan. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, Vol. 28, 167 p.
- TREYDTE, K., SCHLESER, G.H., SCHWEINGRUBER, F.H.; WINIGER, M. 2001: The climatic significance of δ¹³C in subalpine spruces (Lötschental, Swiss Alps). A case study with respect to altitude, exposure and soil moisture. *Tellus* 53B, 5: 593–611.
- WIMMER, R. 2001: Arthur Freiherr v. Seckendorff-Gudent and the early history of tree-ring crossdating. *Dendrochronologia* 19: 153–158.

Autorinnen und Autoren

Dr. PAOLO CHERUBINI*, Dr. HOLGER GÄRTNER, Dr. JAN ESPER, MICHÈLE KAENNEL DOBBERTIN, PD Dr. KLAUS FELIX KAISER, Dr. ANDREAS RIGLING, Dr. KERSTIN TREYDTE, Dr. NIKLAUS E. ZIMMERMANN, Dr. OTTO ULRICH BRÄKER, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf.

*Korrespondenz, E-Mail: paolo.cherubini@wsl.ch.