

# Geomorphologie und Jahrringe – Feldmethoden in der Dendrogeomorphologie

HOLGER GÄRTNER, JAN ESPER UND KERSTIN TREYDTE

Keywords: Tree rings; dendrogeomorphology; mass movements; geomorphic mapping. FDK 551 : 561.24 : UDK 551.4

## 1. Einleitung

In den letzten zwei Dekaden hat sich die Jahrringforschung zu einer vielschichtigen Wissenschaft entwickelt, deren Teildisziplinen durch den Begriff Dendroökologie zusammengefasst werden (BRÄUNING 1995; SCHWEINGRUBER 1983, 1996). Vor allem in den Geowissenschaften wurde die Jahrringanalyse zu einer wichtigen Methode, um vergangene Umweltbedingungen und -prozesse zu erfassen und sie zu interpretieren (BRÄUNING 1995). So zeigt auch die aktuelle Diskussion über die Auswirkungen des globalen Klimawandels und daraus resultierender Umweltveränderungen auf die Frequenz und Magnitude unterschiedlichster Massenbewegungen die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Methoden, um vergangene wie auch rezente Prozesse zu erfassen und zu quantifizieren.

Speziell in der Geomorphologie eröffnete die Jahrringanalyse (Dendrogeomorphologie) neue Möglichkeiten, gravitative Prozesse zu datieren und auch zu rekonstruieren (ALESTALO 1971; SHRODER 1980; SCHWEINGRUBER 1983, 1996; BRAAM *et al.* 1987a, 1987b). Der Effekt unterschiedlichster Massenbewegungen auf das Wachstum der Bäume wurde von SHRODER (1978) beschrieben, der den Begriff «Process-Event-Response-Chain» in die Dendrogeomorphologie einführte. Damit wurde erstmals der Zusammenhang zwischen geomorphologischen Prozessen, deren Wirkungen auf den Baum und resultierenden Wachstumsreaktionen in den Mittelpunkt gestellt. Dieses Prinzip bildet die konzeptionelle Grundlage aller dendrogeomorphologischen Untersuchungen.

In der Folge fand die Dendrogeomorphologie breitere Anwendung in den Geowissenschaften. Die Analyse von Wachstumsreaktionen im Stamm beeinflusster Bäume ermöglicht die jahrgenaue Datierung von Murgängen (BAUMANN & KAISER 1999; HUPP 1984; HUPP *et al.* 1987; GÄRTNER *et al.* 2003a) und Rutschungen (BÉGIN & FILION 1988; DENNERLER & SCHWEINGRUBER 1993; FILION *et al.* 1991; JACOBY *et al.* 1992; FANTUCCI & MCCORD 1995; SCHMID & SCHWEINGRUBER 1995; LA-TELTIN *et al.* 1997; FANTUCCI 1999; GERS *et al.* 2001).

Dendrogeomorphologische Wurzelanalysen ermöglichen die Altersbestimmung von Adventivwurzeln (MARIN & FILION 1992; STRUNK 1989a, 1989b, 1990, 1991) zur Datierung von Verschüttungsprozessen (z.B. Murgänge, STRUNK 1992, 1995, 1997), die Veränderungen von Küstenlinien oder Flussläufen (SIGAFOOS 1964) und daraus resultierende Veränderungen der hydrologischen Verhältnisse des Untergrundes (LAMARCHE 1966; HELLEY & LAMARCHE 1968; BÉGIN *et al.* 1991a, 1991b; LEPAGE & BÉGIN 1996). In den 1960er Jahren fanden Wurzel-datierungen erstmals eine konkrete Anwendung in den Geowissenschaften zur Rekonstruktion von Erosionsprozessen (LAMARCHE 1961, 1963, 1968; EARDLEY 1967). Seit dieser Zeit wurden Wurzelanalysen vereinzelt eingesetzt, um erosive Prozesse zu rekonstruieren (CARRARA & CARROLL 1979; DUNNE *et al.* 1978; DANZER 1996; MORNEAU & PAYETTE 1998). Der eigentliche Schwerpunkt liegt aber in der Untersuchung von Wurzelsystemen zur Beurteilung der Hangstabilität und Bodenfixierung (NILAWEERA & NUTALAYA 1999; NORMAN *et al.* 1995; WATSON *et al.* 1999; ZHOU *et al.* 1997, 1998).

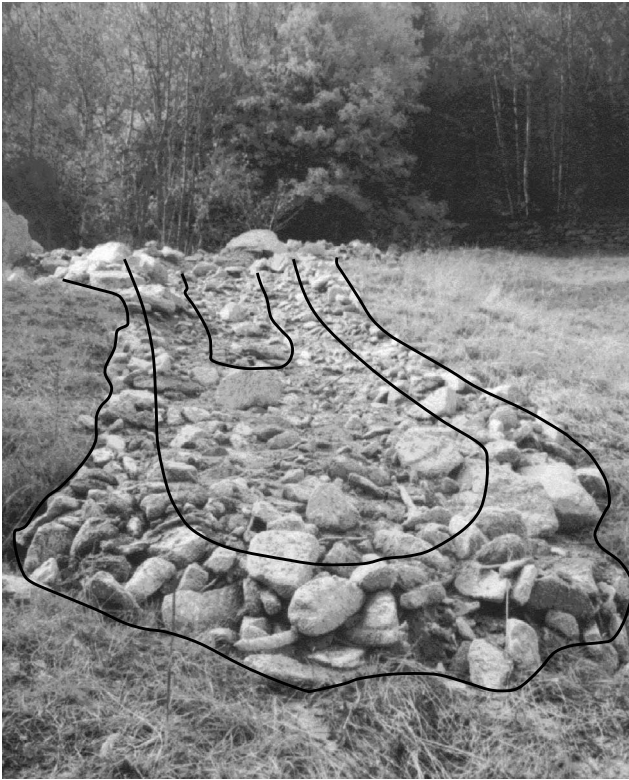
Die holzanatomische Analyse variabler Wachstumsreaktionen in Baumwurzeln wurde in den Geowissenschaften bisher vergleichsweise wenig angewendet. Während die anatomische Struktur des Stammholzes (SANIO 1872, 1873; SCHWEINGRUBER 1978, 1990) sowie die spezifische Reaktion von Bäumen auf sich verändernde Umweltbedingungen weitreichend untersucht wurden (CHERUBINI *et al.* 1997; DESPLANAQUE *et al.* 1999; RIGLING *et al.* 2002; TESSIER *et al.* 1997; SCHWEINGRUBER 1983, 1996; WIMMER & VETTER 1999), ist die spezielle Anatomie des Wurzelholzes bis heute nur relativ selten Gegenstand wissenschaftlicher Publikationen (CUTLER *et al.* 1987; SCHWEINGRUBER 2001; GÄRTNER 2003b). Die umfangreichen Arbeiten von CUTLER (1976, 1978) richteten sich gezielt auf die Artenbestimmung durch detaillierte anatomische Untersuchungen an Wurzeln (CUTLER & RICHARDSON 1989) und auf die Auswertung der Morphologie der Wurzelsysteme nach Windwurfereignissen (CUTLER 1988; CUTLER *et al.* 1989).

Untersuchungen bezüglich der generellen Eignung der Wurzeljahrringe zur Datierung (KRAUSE & ECKSTEIN 1993; KRAUSE & MORIN 1999) haben gezeigt, dass sie auch mittels «Crossdating» zur Altersbestimmung abgestorbener Bäume herangezogen werden können (YAMAGUCHI *et al.* 1997). Neuere Arbeiten zur holzanatomischen Analyse freigelegter Wurzeln demonstrieren die Möglichkeit der Rekonstruktion erosiver Prozesse (GÄRTNER 2003a, 2003b; GÄRTNER *et al.* 2001, 2003b).

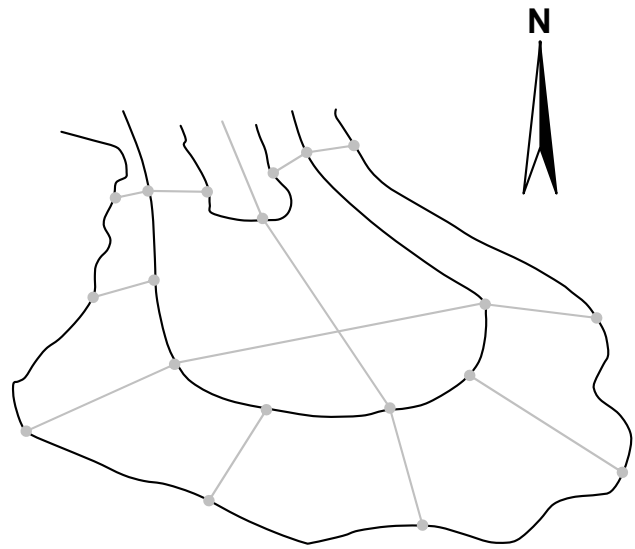
Die Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse durch Jahrringanalysen erfordert detaillierte Kenntnisse sowohl in der Geomorphologie als auch in der Jahrringauswertung. Die im Bereich der Dendrogeomorphologie angewandten Untersuchungsansätze basieren auf anerkannten Methoden der Geomorphologie (Geländeansprache, Prozessbestimmung, Kartierung) und der Dendrochronologie (Baumauswahl, Probengewinnung, Präparation, Auswertung). Erst die Kombination der beiden Forschungsrichtungen erlaubt eine genaue Datierung und somit Rekonstruktion spezifischer Prozesse.

Die rein jahrringanalytische Auswertung von Störungen im Wachstumsverlauf eines Baumes erlaubt zwar die Datierung einer Störung (z.B. das Einsetzen von Reaktionsholz im Jahrring als Reaktion auf eine Druckbelastung), die Bestimmung des Prozesses, welcher zu der Störung führte, ist dadurch allerdings nicht möglich. Um dies zu realisieren, muss im Vorfeld der Baumauswahl und Probennahme eine genaue geomorphologische Standortsansprache und Prozessanalyse durchgeführt werden.

Nachfolgend werden die notwendigen Schritte dendrogeomorphologischer Feldmethoden erläutert, wobei besonderer Wert auf die zu erhebenden Parameter gelegt wird. Die Feldmethoden, speziell die der Probennahme, wurden dabei immer im Hinblick auf zu erwartende Reaktionen in den Jahrringen der beeinflussten Bäume beschrieben. Die weitere Präparation und Analyse der Proben wird hierbei nicht besprochen. Diesbezüglich sei hier auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen (FRITTS 1976; SCHWEINGRUBER 1983, 1990, 1996; COOK & KAIRIUKSTIS 1990; ESPER & GÄRTNER 2001).



Parameter:  
Distanz, Neigung, Richtung



**Abbildung 1:** Beispiel der Kartierung einer Murlobe.

Die Konturen der Ablagerungsform werden bestimmt und vermessen (links) (Foto: H. Gärtner). Die gewonnenen Daten werden dann räumlich orientiert für die Darstellung in der Karte genutzt (rechts).

## 2. Feldmethoden der Dendrogeomorphologie

### 2.1 Datenerhebung

Im Vorfeld der Geländearbeiten werden zunächst Karten und Luftbilder der ausgewählten Untersuchungsgebiete zur vorläufigen Bestimmung einzelner Prozessbereiche ausgewertet. Zudem hat es sich als hilfreich erwiesen, existierende Archive auszuwerten (Kirchenbücher, Gemeindechroniken, Bauarchive usw.), welche Hinweise auf frühere Ereignisse (Prozesse) enthalten können. Durch anschließende Geländebegehungen werden diese Informationen verifiziert und die ausgewiesenen Prozessbereiche nach «geeigneten» Standorten abgesucht. Welche Kriterien im Einzelnen für die Standortwahl ausschlaggebend sind, variiert mit der Zielsetzung der Untersuchung, allerdings sollten zwei Voraussetzungen immer erfüllt sein: a) Oberflächenformen (Eintiefungen, Ablagerungen usw.) können spezifischen Prozessen zugeordnet werden und b) im Einflussbereich dieser Prozesse sind Bäume vorhanden, die durch diese beeinflusst wurden oder auf den resultierenden Formen aufwuchsen.

Aus diesen Vorarbeiten lässt sich bereits einschätzen, ob man mit einer jahrgenauen Datierung früherer Ereignisse durch die Analyse beeinflusster Bäume rechnen kann oder eher mit einer Mindestalterbestimmung der Formen durch die reine Altersbestimmung der aufgewachsenen Bäume (SCHWEINGRUBER 1983, 1996). Diese unterschiedlichen Zielsetzungen beeinflussen bereits die Art der Beprobung für die Jahrringanalyse (siehe Kapitel 2.1.4).

#### 2.1.1 Prozessbestimmung und Kartierung

Wie bereits zuvor ausgeführt, wird die Auswahl eines Standortes im jeweiligen Untersuchungsgebiet massgeblich durch

das Vorhandensein geeigneter Bäume bestimmt. Ist ein solcher Standort festgelegt, erfolgt die Prozessbestimmung für das Untersuchungsgebiet über einen retrospektiven Ansatz in unterschiedlichen Skalen (nach DIKAU 1988).

Zunächst sollte man das Untersuchungsgebiet auf der Mesoskala (100 bis 10 000 m) in das System der weiteren Umgebung einordnen und Informationen über geologische und klimatische Gegebenheiten des Gebietes einholen. Gleiches gilt für Informationen über mögliche anthropogene Beeinflussungen (waldbauliche Massnahmen, Landnutzung, Schutzverbauungen usw.). Weiterhin muss der im Gebiet dominante Prozess durch Reliefformenanalyse (GÄRTNER 2003b) bestimmt und durch Form- und Materialansprache direkt im Gelände verifiziert werden.

Danach erfolgt die genaue Standortauswahl, d.h. das für die angestrebte Rekonstruktion geeignete, baumbestandene Gebiet wird festgelegt. Form und Zusammensetzung der Erosions- und Ablagerungsformen des Standortes (Mikroskala, 1 bis 100 m) werden dahingehend untersucht, ob sie dem zuvor ausgewiesenen, dominanten Prozess (z.B. Rutschung) oder eher einem sekundären, nachgeordneten Prozess (z.B. verstrühen einer übersteilten Anrisszone) zuzuordnen sind (GÄRTNER 2003b).

Eine genaue Kartierung der Ablagerungsformen (Abbildung 1) hat sich als nützlich erwiesen, da oft erst die resultierende Karte einen genauen Überblick über die Zusammenhänge der einzelnen Formen bietet und somit eine detaillierte Prozessanalyse erlaubt (GÄRTNER et al. 2003a). Die Karte dient zudem als Grundlage für die Auswahl der zu analysierenden Bäume.

#### 2.1.2 Baumauswahl

Nachdem die existierenden Geländeformen bestimmten Prozessen zugeordnet wurden, beginnt die Auswahl der Bäume,

Einfluss	Baummorphologie	Reaktionen im Jahring
Druck	Schrägstellung, Stammkrümmung	Exzentrizität (Druck-/Zugholz)
Destabilisierung des Untergrundes	Schrägstellung, Stammkrümmung	Exzentrizität (Druck-/Zugholz), Wachstumseinbruch bei Störung des Wurzelsystems
Freistellung	Nicht sichtbar (evtl. Baumstümpfe in direkter Umgebung vorhanden)	Wachstumssteigerung
Einschlag	Verletzung, Überwallung	Überwallung, Kallusgewebe
Einerdung	Wurzelanlauf nicht sichtbar (*)	Wachstumseinbruch (u.U. -steigerung)
Erosion (A)	Wurzeln teilweise freigelegt, noch lebend	Strukturveränderungen in den Zellen der Wurzeljahrringe
Erosion (B)	Wurzeln teilweise freigelegt, abgestorben	Wachstumseinbruch in den Jahrringen des Stammes
	Oft auch Schrägstellung	(s. Druckeinwirkung, Destabilisierung)

(\*) Die Bildung eines Adventivwurzelschizontes kann gelegentlich den Eindruck eines ursprünglichen Wurzelanlaufes vermitteln. In Zweifelsfällen ist eine Überprüfung durch Graben ratsam.











die für eine Rekonstruktion früherer Ereignisse in Frage kommen. Dies sind Bäume, die im unmittelbaren Einflussbereich des rekonstruierten Prozesses bzw. der zugeordneten Geländeformen wachsen. Hierbei gilt es zu unterscheiden, ob und wie diese Bäume durch die Prozesse mechanisch beeinflusst wurden. Für diese Bestimmung sind die relative Position zu den Geländeformen und die Morphologie des Baumes gemeinsam ausschlaggebend.

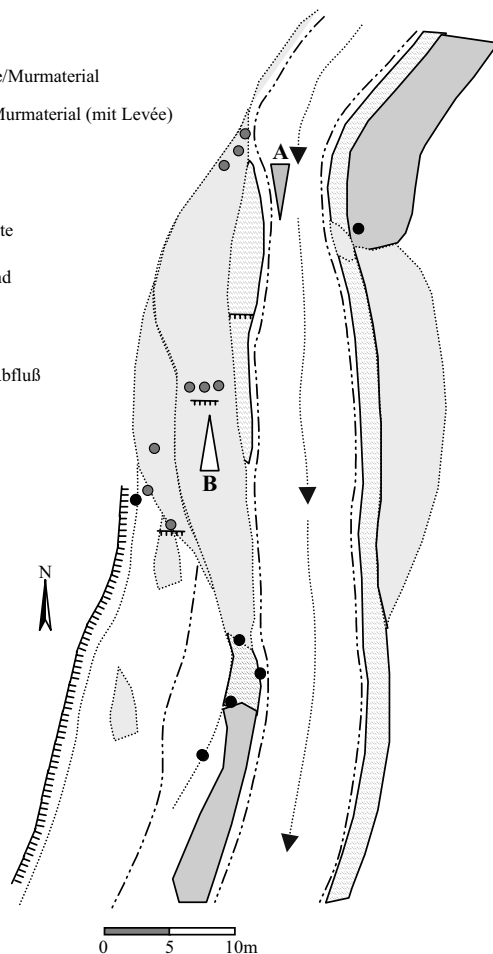
Zur Morphologie des Baumes muss man anmerken, dass ein von geomorphologischen Prozessen oder sonstigen Fremdeinflüssen (Strassen- und Wegebau, Schneedruck, Wind usw.) mechanisch unbeeinflusst wachsender Baum immer einen senkrecht stehenden Stamm ausbildet. Dies ist bedingt durch die negativ gravitropen Ausrichtung des Haupttriebes am Schwerfeld der Erde (ROSEN *et al.* 1999; SITTE *et al.* 1998). Zeigt ein Stamm nun eine deutliche Neigung und/oder Krüm-

**Tabelle 1:** Externe Störungen des Baumwachstums und die daraus resultierenden, äusserlich sichtbaren und nicht sichtbaren (im Jahring) Wachstumsreaktionen

### Kartierung Murrinne Tännbach, Lötschental, Schweiz

**Legende:**

-  Altes Levée/Murmaterial
-  Aktuelles Murmaterial (mit Levée)
-  Baggerwall
-  Levée
-  Gerinnekante
-  Erosionsrand
-  Lärche
-  Ahorn
-  Aktueller Abfluss
-  Stufe



**Abbildung 2:** Beispiel der Darstellung der kartierten Formen einer Murrinne und der entsprechenden Position der zu untersuchenden Bäume.

A: Foto der Murrinne zur Zeit der Kartierung, Blick in Fließrichtung (A+ grauer Pfeil = Aufnahme-position und Blickrichtung). B: Foto der Geländestufe, die durch an der Vegetation gestautes Murmaterial gebildet wird (B+ weisser Pfeil = Aufnahme-position und Blickrichtung) (Fotos: H. Gärtner).

mung, ist dies auf externe Einflüsse (z.B. geomorphologische Prozesse) zurückzuführen. *Tabelle 1* fasst die wichtigsten äusseren Einflüsse, die daraus resultierenden gestaltlichen Ausprägungen des Baumes (Baummorphologie) und die zu erwartenden Reaktionen im Jahrringbild zusammen.

Die Dokumentation der Position des Baumes zu den kartierten Geländeformen ist für die spätere Auswertung der Jahrringanalysen unabdingbar (*Abbildung 2*). Findet man beispielsweise inmitten der Ablagerung eines feinkörnigen Murganges einen Baum, der in seiner Wuchsform keine Auffälligkeiten zeigt, dessen Wurzelanläufe allerdings nicht sichtbar sind, so handelt es sich um eine Einerdung des Stammes durch das Murereignis, welches die Ablagerung bildete (siehe Kapitel 2.1.4, Abschnitt «Einerdung»). Die jahrringanalytische Auswertung wird es also erlauben, diesen bestimmten Prozess zu datieren.

Untersucht man dagegen einen Baum, der z.B. eine starke Stammneigung aufweist, wobei die Kartierung aber keine Zuordnung zu einem Prozess erlaubt, kann man zwar das Einsetzen der Wachstumsreaktion auf die Schrägstellung datieren, der zugrunde liegende Prozess ist dadurch aber nicht bestimmbar.

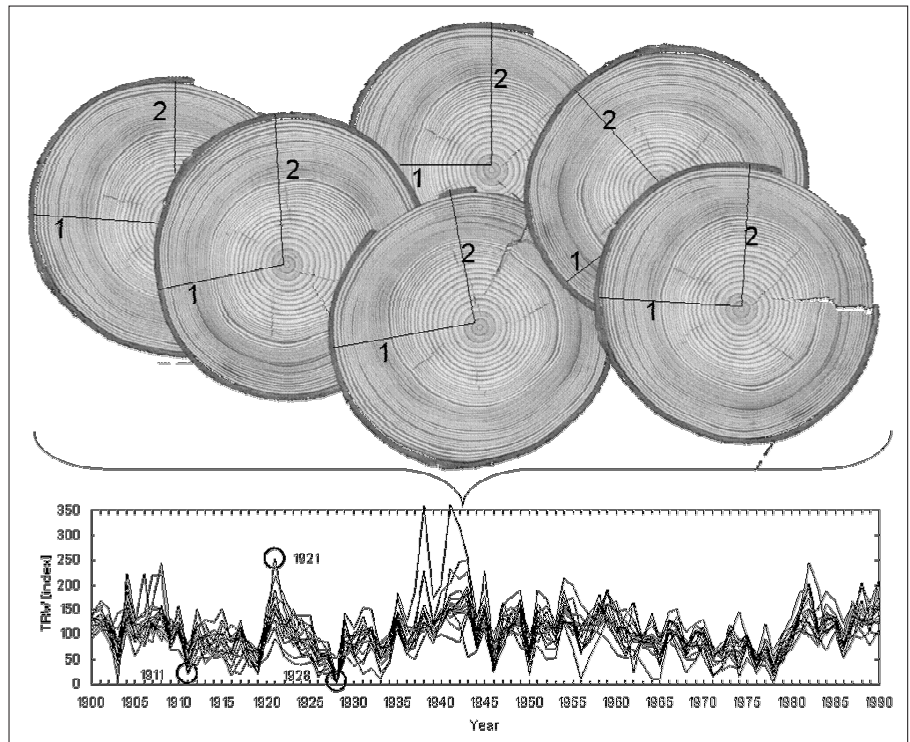
### 2.1.3 Dokumentation und Referenzstandort

Die äussere Form und die Jahrringstruktur eines Baumes werden durch vielfältige interne und externe Faktoren beeinflusst. Schon geringe Unterschiede bezüglich der Umweltfaktoren an unterschiedlichen Standorten (z.B. Höhenlage, Exposition, Temperatur, Niederschlag) können Unterschiede in der Jahrringstruktur bedingen (SCHWEINGRUBER 1996). Dementsprechend gross können Wachstumsunterschiede an verschiedenen Standorten sein.

Ziel dendrogeomorphologischer Arbeiten ist die Datierung von auf den Baum einwirkenden Prozessen, die zu einer Veränderung der «normalen», also standorttypischen Struktur des Jahrringbildes führen. Dies setzt zwei Dinge voraus: a) Die Eigenschaften des Untersuchungsstandortes (Standortparameter) müssen dokumentiert werden. b) Ein Referenzstandort für die Jahrringanalyse muss bestimmt werden, der die gleichen Standorteigenschaften und die gleichen Baumarten aufweist, wobei das Auftreten des zu rekonstruierenden Prozesses aber mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

#### 2.1.3.1 Standortparameter

Die spezifischen Umweltbedingungen des Untersuchungsgebietes steuern nicht nur das Wachstum der Bäume, sie beeinflussen auch massgeblich die Eigenschaften und Auftretenswahrscheinlichkeit der zu untersuchenden Prozesse. Die reine Datierung früherer Ereignisse ermöglicht die Einschätzung der aktuellen Prozessdynamik in dem durch die Jahrringanalyse geöffneten Zeitfenster. Um allerdings Rückschlüsse über das Systemverhalten (z.B. Schwellenwerte des Einsetzens eines Prozesses) ziehen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über die Eigenschaften des Untersuchungsgebietes notwendig. Die wichtigsten zu erhebenden Parameter sind hier-



**Abbildung 3: Erstellen einer Referenzchronologie.**

Zum Erstellen einer Referenzchronologie muss eine grössere Anzahl ungestörter Bäume (mindestens 15 der gleichen Art) beprobt und deren Jahrringbreitenvariation gemessen werden. Die aus den Einzelkurven resultierende Chronologie (schwarze Kurve) stellt die Referenz des Gebietes dar. Die Kreissignaturen markieren Extremjahre, die nicht geomorphologischen Ursprungs sind.

bei: Geologie, Substrat, Vegetationsbedeckung, Temperatur, Niederschlag, Exposition, Höhe, Neigung. Diese Parameter sollten in Abhängigkeit des zu untersuchenden Prozesses für das gesamte Untersuchungsgebiet spezifiziert werden. Es genügt bei vielen Prozessen nicht, den reinen Baumstandort zu bewerten:

- Bei der Bearbeitung eines räumlich eher eng begrenzten Prozesses, z.B. der Bestimmung von Solifluktrationsraten (ZOLTAI 1975; JAKOB 1995) oder Aktivitätszuständen von Blockgletschern (CANNONE & GERDOL 2003; ROER *et al.* 2003) sind die Parameter der direkten Umgebung ausschlaggebend.
- Auch bei einer Rutschung sind Baumstandort und Prozessbereich in den meisten Fällen zur Deckung zu bringen. Allerdings muss auch hier die weitere Umgebung der Rutschung (z.B. Geologie, Substrat und hydrologische Verhältnisse des Untergrundes) berücksichtigt werden (SCHMID & SCHWEINGRUBER 1995; GERS *et al.* 2001).
- Umfangreichere Erhebungen sind dagegen bei Prozessen durchzuführen, die eine grosse räumliche Ausdehnung aufweisen, wobei der Baumstandort oft nur einen kleinen Teil des Prozessbereiches darstellt. Ein Beispiel hierfür ist die Untersuchung von Murgängen in alpinen Gebieten (GÄRTNER & STOFFEL 2002). In den Alpen liegt das Ursprungsgebiet (die Anrisszone) einer Mure häufig in vegetationsfreien Bereichen oberhalb der Baumgrenze. Die Umweltbedingungen der einzelnen Teilbereiche (Anrissgebiet, Transportstrecke und Ablagerungsbereich) unterscheiden sich zumeist deutlich voneinander. So sind in vielen Fällen die Temperatur und Niederschlagsbedingungen im Anrissgebiet grundlegend anders als im Ablagerungsbereich. Die Höhendifferenz zwischen diesen Teilbereichen liegt häufig weit über 1000 m (GÄRTNER *et al.* 2003a).

Auch wenn diese Informationen für die reine Ereignisdatierung nicht unbedingt erforderlich zu sein scheinen, sind sie

jedoch für eine Rekonstruktion vergangener Ereignisse und die Einschätzung einer möglichen zukünftigen Entwicklung des Systems unerlässlich.

### 2.1.3.2 Referenzstandorte

Die exakte Rekonstruktion vergangener Ereignisse erfordert die jahrgenaue Datierung der Jahrringe. Zudem müssen Störungen im Jahrringbild der Bäume des Untersuchungsstandortes als solche erkannt und vom «normalen», d.h. gebiets-spezifischen Jahrringbild, unterschieden werden können. Als «gebietsspezifisch» gelten Jahrringvariationen, die sich in den Mittelkurven der unbeeinflussten Referenzstandorte zeigen.

Um dies zu gewährleisten, muss für jede zu untersuchende Baumart eine Referenzchronologie erstellt werden (Abbildung 3). Diese repräsentiert das mechanisch ungestörte Wachstum der Bäume unter gleichen Umweltbedingungen wie die des Untersuchungsstandortes, d.h. unter Ausschluss jeglichen Einflusses durch den zu rekonstruierenden Prozess.

Da das Wachstum eines Baumes grundlegend durch die biotischen und abiotischen Faktoren seines Standortes gesteuert wird (siehe RIGLING *et al.* in diesem Heft), muss bei der Auswahl des Referenzstandortes darauf geachtet werden, dass die Standortparameter denen des Untersuchungsstandortes entsprechen. Dies wird in der Regel erreicht, indem Standorte gleicher Höhenlage, Exposition und Artenzusammensetzung gewählt werden.

### 2.1.4 Beprobung

Die spätere Jahrringanalyse erfordert die Entnahme von Proben aus den zu untersuchenden Bäumen. Da in den seltensten Fällen Stammscheiben entnommen werden können, wird hierfür ein Zuwachsbohrer verwendet, mit dessen Hilfe 5 mm starke Bohrkerne aus dem Stamm entnommen werden (SCHWEINGRUBER 1983). Der Entnahmestelle der Proben am Stamm kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu.

Für alle Forschungsrichtungen, die sich mit der Rekonstruktion von standörtlichen Umweltbedingungen wie z.B. Temperatur, Niederschlag, Nährstoffverfügbarkeit oder hydrologische Verhältnisse des Untergrundes befassen, sind die Vorgaben für die Probennahme relativ einfach: Man entnimmt zwei gegenüberliegende (oder im rechten Winkel zueinander stehende) Bohrkerne aus einer einheitlichen Höhe von 1,3 m über dem Boden. Die Entnahmehöhe schließt mögliche Störungen im Jahrringbild durch die Wurzelanläufe und/oder stabilisierende Wachstumsreaktionen auf mechanische Einflüsse (z.B. Winddruck) am Stammfuß aus. Zudem ist das Arbeiten mit dem Zuwachsbohrer in dieser Entnahmehöhe einfacher.

Diese Vorgaben entsprechen auch der Beprobungsstrategie am Referenzstandort dendrogeomorphologischer Untersuchungen. In stark reliefiertem Gelände, insbesondere in

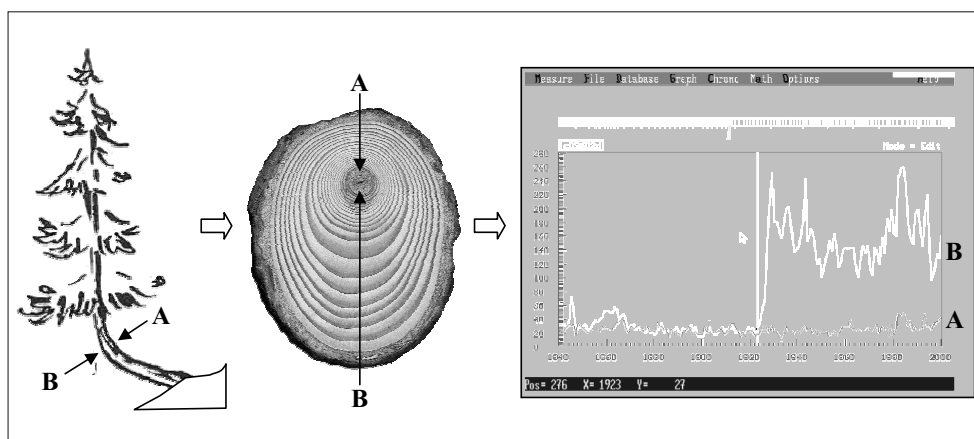
Hanglagen mit starker Neigung, sollte man die Bohrkerne parallel zum Hangverlauf (gegenüberliegend) entnehmen. Dadurch kann man mögliche Ausgleichsreaktionen des Stammes auf die starke Hangneigung, die das Jahrringbild beeinflussen können, minimieren, in vielen Fällen sogar ausschließen.

Bei der Probennahme für dendrogeomorphologische Untersuchungen spielt die Baummorphologie und die Art der Beeinflussung eine entscheidende Rolle. Wachstumsreaktionen auf mechanische Einflüsse treten nicht gleichmässig über den Stamm verteilt auf. Sie konzentrieren sich, je nach Art des Einflusses, auf bestimmte Regionen des Stammes. Dementsprechend gezielt muss die Probennahme erfolgen. Der Grundsatz der Beprobung in 1,3 m Höhe findet hier keine Anwendung. Von der Art der Beprobung hängt in vielen Fällen der Erfolg oder Misserfolg dendrogeomorphologischer Untersuchungen ab.

### Schrägstellung

Die am deutlichsten erkennbare Beeinflussung eines Baumes durch geomorphologische Prozesse ist die Schrägstellung. Die häufigsten Ereignisse, die zu einer Schrägstellung führen, sind einseitige Anschüttung von Material (z.B. Felssturz, Murgang, Lahar) oder eine Destabilisierung des Untergrundes (Rutschung, Erosion). Die Probennahme am Stamm erfolgt in diesen Fällen grundlegend entsprechend der Neigungsrichtung des Stammes. Es wird also je eine Probe auf der druckbelasteten und der entsprechenden Gegenseite entnommen (Abbildung 4). Dies ist darin begründet, dass ein Baum auf mechanische Druckbelastungen des Stammes mit Reaktionsholz immer parallel zur Belastungsrichtung reagiert. Auch wenn Nadelbäume mit der Bildung von Druckholzzellen in Druckrichtung (Unterseite des geneigten Stammes), Laubbäume dagegen mit Zugholz entgegen der Druckrichtung (Oberseite des geneigten Stammes) reagieren (WESTING 1965; SCHWEINGRUBER 1983, 1996), bleibt die Art der Beprobung gleich, da in jedem Fall mindestens zwei Proben entnommen werden müssen. Erst ein Vergleich der Jahrringausprägung der Ober- und der Unterseite ermöglicht die genaue Bestimmung des Einsetzens der Reaktion. Zeigt der Stamm bereits eine Krümmung, sollte man den Bohrer am Punkt der stärksten Krümmung oder einige Zentimeter darüber ansetzen. In diesem Bereich ist die stärkste Ausprägung der Reaktion zu erwarten.

Zeigt der geneigte Stamm aber keine Krümmung oder ist die sichtbare Krümmung gleichmässig über den Stamm verteilt, ist es schwierig, den Entnahmebereich genau einzugrenzen. Die stärksten Reaktionen sind in dem Bereich des Stammes zu erwarten, in den der neue Schwerpunkt des Stammes verschoben wurde (MATTHECK 1993). Da dieser Punkt im Gelände oftmals nicht ohne weiteres festgelegt werden kann oder einfach auch ausser Reichweite der Beprobungsmöglichkeit liegt, sollte man die Proben aus dem unteren Bereich des Stammes (ab 0,6 m über dem Boden) entnehmen. Die genaue



**Abbildung 4: Beprobungsstelle.**

Die Beprobung eines schräg gestellten Baumes erfolgt immer im Bereich der stärksten Krümmung, jeweils auf der druckbelasteten Seite (B), an der die Bildung von Druckholz (Beispiel Nadelbaum) zu erwarten ist (B im Querschnitt) und der Gegenseite (A). Die resultierenden Kurven der Jahrringbreitenmessung zeigen deutlich das Einsetzen der Reaktionsholzbildung (Diagramm rechts; Screenshot des Messergebnisses im Programm TSAP – Time Series Analysis Program)

Entnahmehöhe sollte dabei in Abhängigkeit der Reliefsituation bestimmt werden. Auch wenn man damit unter Umständen nicht die Stelle der stärksten Reaktion erfasst, wird man das Einsetzen der Reaktion doch bestimmen können, solange man auf die Beprobungsrichtung achtet.

Die einseitige Bildung von Reaktionsholz führt zu einer Exzentrizität im Jahrringbild des Stammes (*Abbildung 4*). Obwohl auch andere Einflüsse (z.B. ungleichmäßige Verteilung von Nährstoffen oder Feuchtigkeit im Untergrund, des Wurzelsystems oder der Baumkrone) zu einer Exzentrizität führen können (BRAAM *et al.* 1987a, 1987b; SCHWEINGRUBER 1983, 1996), erlaubt das Auftreten von Reaktionsholz doch eine Zuordnung zu einer externen mechanischen Beeinflussung durch geomorphologische Prozesse. Die Einhaltung der zuvor genannten Beprobungsrichtung erlaubt zudem die Bestimmung eines Exzentrizitätsindex (ALESTALO 1971), welcher über die Datierung des Ereignisses hinaus auch die Abschätzung des Aktivitätsgrades etwa von Rutschungen erlaubt. Eine Weiterentwicklung dieser Methode stellt der Exzentrizitätsindex von BRAAM *et al.* (1987a, 1987b) dar. Die Entnahme von (zwei) zusätzlichen Bohrkernen ermöglicht die statistische Auswertung und Rekonstruktion der Aktivität von grossflächigen Rutschungen (GERS *et al.* 2001). Die zusätzlichen Bohrkern werden dabei jeweils im rechten Winkel zur Druckbelastungsrichtung (A in *Abbildung 4*) entnommen.

#### Einerdung

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird das Jahrringbild eines teilweise verschütteten Baumes (*Abbildung 5*) einen durch die Einerdung bedingten Wachstumseinbruch zeigen, wodurch die genaue Datierung des Ereignisses ermöglicht wird (*Tabelle 1*). In selteneren Fällen kann es durch ein solches Ereignis auch zu einer Wachstumssteigerung kommen. Dies ist vom Substrat des Standortes und der Art und Zusammensetzung des überdeckenden Materials abhängig (STRUNK 1995). Zur Analyse dieser Zuwachsänderungen genügt es im Allgemeinen, zwei gegenüberliegende Proben (hangparallel) in etwa 1,3 m Höhe aus dem Stamm zu entnehmen. Zeigt der Stamm eine Neigung und/oder ist eine Druckbelastung des Stammes durch einseitig angeschüttetes Material zu erwarten, empfiehlt es sich, vier Proben entsprechend den Vorgaben zur Bestimmung des Exzentrizitätsindex nach BRAAM *et al.* (1987a, 1987b) zu entnehmen (vergleiche oben, Abschnitt «Schrägstellung»). Dadurch werden auch eventuell auftretende Reaktionsholzbildungen erfasst.

Eine Besonderheit bei Verschüttungen des Stammes ist die Bildung von Adventivwurzeln kurz unterhalb der neuen Geländeoberfläche (BURGER 1930; BANNAN 1941). In vielen Fällen ist die Verschüttung deutlich erkennbar, d.h. am Übergang zwischen Stamm und Geländeoberfläche sind keine Wurzelanläufe zu sehen.

Je nach Stärke und Alter der Verschüttung kann es zur Ausbildung eines neuen Wurzelhorizontes kommen, der die Funktion des ursprünglichen Horizontes mehr und mehr übernimmt (STRUNK 1995). In diesem Fall ist es nicht ohne weiteres möglich, diesen von einem ursprünglichen Wurzelhorizont zu unterscheiden. Bei Bäumen, die (scheinbar) auf Materialablagerungen aufgewachsen sind, ist es im Zweifelsfall ratsam, direkt am Stammfuss etwas zu graben. Dadurch lässt sich feststellen, ob sich der Stamm unter den Wurzelanläufen weiter nach unten in das Substrat erstreckt oder nicht.

In Gebieten mit hohen Wiederkehrintervallen der verschüttenden Prozesse kann es je nach Häufigkeit der Verschüttungen zur Bildung von mehreren Adventivwurzelhorizonten kommen (STRUNK 1991, 1992). In diesem Fall erlaubt die Altersbestimmung der Adventivwurzeln eine Datierung der Einzelereignisse, die sich oft nicht mehr im Jahrringbild



**Abbildung 5:** Einerdung des unteren Stammbereiches (weisse Pfeile) durch Murgangablagerungen.

Im Bild deutlich erkennbar die Murrinne und die seitlich abgelagerten Levées (Foto: Isabelle Roer).

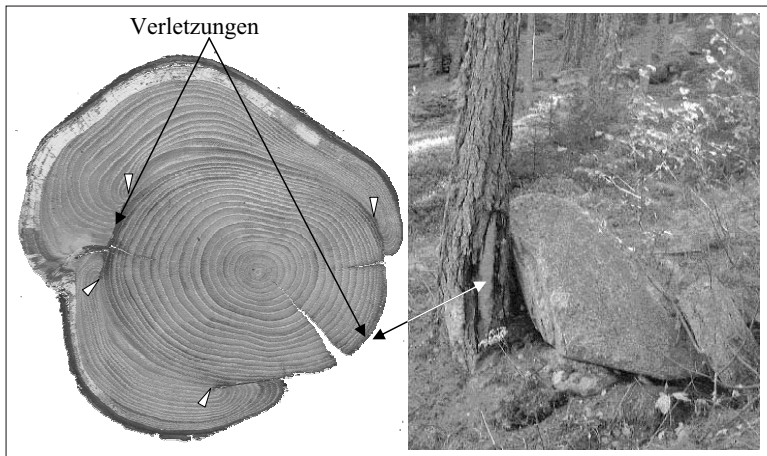
des Stammes ausprägen. Die Vermessung der Abstände zwischen den einzelnen Wurzelhorizonten und die Aufnahme des entsprechenden Profils im Substrat erlaubt zusätzlich eine Rekonstruktion der Ablagerungshöhen einzelner Ereignisse.

Die Datierung von Adventivwurzeln erlaubt allerdings keine jahrgenaue Rekonstruktion der Ereignisse. Grund dafür ist die vergleichsweise hohe zeitliche Variabilität der Adventivwurzelbildung als Reaktion auf eine Verschüttung. Diese kann zwischen einem und fünf Jahren liegen (STRUNK 1995). Trotz dieser Einschränkung ist die Analyse von Adventivwurzeln eine der genauesten Methoden zur Datierung umgelagerter Substrate.

Für die Details der eher aufwendigen Beprobung und Auswertung sei hier auf die Arbeit von STRUNK (1995) verwiesen. Die korrekte Datierung des Wurzelalters (und damit die Annäherung an den Zeitpunkt der Verschüttung) erfordert die Bestimmung des Jahrrings, in dem die Adventivwurzel gebildet wurde (Keimungsjahr) im Stamm. Hierfür müssen Stammscheiben im Bereich des Wurzelansatzes entnommen und präpariert werden, um den Keimpunkt der Wurzel zu lokalisieren. Durch die Beprobung der Wurzel am Stammansatz ist es nicht möglich, das Gesamtalter der Wurzel zu bestimmen. Das anhaltende sekundäre Dickenwachstum des Stammes führt mit den Jahren dazu, dass die ersten Jahrringe der Wurzel (in Abhängigkeit ihres Längenwachstums) im Bereich des Stammansatzes nicht mehr vorhanden sind (SCHWEINGRUBER 1996).

#### Freistellung

Gravitative Prozesse wie Murgänge, Lawinen oder auch Felsstürze führen, je nach Ausprägung und Magnitude des Prozesses, unter Umständen zu einer Freistellung einzelner Bäume in einem dichteren Bestand (GÄRTNER *et al.* 2003a). Die Entnahme benachbarter Bäume, z.B. durch Entwurzelung



**Abbildung 6:** Querschnitt durch einen durch Steinschlag verletzten Baum.

Die grössere Wunde ist bereits äusserlich am Stamm erkennbar (rechte Seite des Querschnittes und Foto). Nach einiger Zeit werden Verletzungen durch das anhaltende Wachstum des Baumes überwallt (linke Seite des Querschnittes) und sind damit von aussen nicht mehr erkennbar. Die weissen Pfeile im Querschnitt markieren jeweils den ersten Jahrring, der unmittelbar nach dem Zeitpunkt der Verletzung beginnt, diese zu überwallen. Dies erlaubt die genaue Datierung des Ereignisses (Foto: H. Gärtner).

oder Abscheren des Stammes, hat eine direkte Wachstumssteigerung im freigestellten Baum zur Folge, sofern dieser nicht ebenfalls massiv beeinflusst wurde. Die Freistellung führt zu einer Reduktion (oder Aufhebung) des Konkurrenzdruckes im aufgelichteten Teil des Bestandes bezüglich der Verfügbarkeit von Licht und Nährstoffen (SCHWEINGRUBER 1996).

Im Gelände ist eine Freistellung an verschiedenen Kennzeichen erkennbar. In vielen Fällen handelt es sich um deutlich erkennbare Schneisen, die sich durch den Bestand ziehen (z.B. Lawenbahnen, Murrinnen). Die Bäume im Randbereich dieser Schneisen sollten Freistellungsreaktionen zeigen. Vereinzelt finden sich auch kleinere Auflichtungen in Beständen, die durch die zu untersuchenden Prozesse bedingt sind. Das deutlichste Zeichen sind Baumstümpfe in unmittelbarer Umgebung eines Baumes. Man sollte bei der Beurteilung der Situation aber beachten, dass es sich hierbei auch um die Folge waldbaulicher Massnahmen handeln kann. Der anthropogene Einfluss auf den zu untersuchenden Baumbestand muss daher bereits im Vorfeld der Datenerhebung recherchiert werden. Lässt man diese Informationen ausser Acht, kann das zu schwerwiegenden Fehlinterpretationen führen.

Die Beprobung zur Rekonstruktion einer Freistellung erfolgt nach den gleichen Vorgaben wie sie zuvor (Einerdung) erläutert wurden. Sofern keine weiteren mechanischen Beeinflussungen des Baumes zu erwarten sind, genügen zwei gegenüberliegenden Proben aus einer Entnahmehöhe von etwa 1,3 m.

### Verletzung

Viele geomorphologische Prozesse führen nicht nur zu Schrägstellung, Verschüttung oder Freistellung eines Baumes. In Abhängigkeit des Materials und der Einschlaggeschwindigkeit kommt es auch zu Verletzungen am Stamm, an Ästen und/oder Wurzeln (Abbildung 6). Reaktionen auf Verletzungen treten dann auf, wenn das Kambium des Baumes im Bereich der Einschlagstelle zerstört wird (SCHWEINGRUBER 1983, 2001). Verletzungen ermöglichen die Rekonstruktion von Steinschlag- (BUTLER *et al.* 1986; GSTEIGER 1993), Murgang- und Lawinenereignissen (CARRARA 1979) oder auch von Seespiegelschwankungen (BÉGIN & PAYETTE 1988; BÉGIN 2000). Am häufigsten werden sie aber zur Erstellung von Feuerchronologien genutzt (BROWN *et al.* 1999; DEY & GUYETTE 2000; GUTSELL & JOHNSON 1996).

Die Probennahme zur Datierung von Verletzungen erfordert die Entnahme von Stammscheiben. Es ist zwar auch möglich, äusserlich sichtbare Verletzung mit Hilfe eines Zuwachsbohrers zu beproben, dabei gibt es aber einige Einschränkungen bezüglich der möglichen Auswertungen. Verletzungen werden durch seitliche Überwallungen geschlossen. An den Rändern der Verletzung bildet sich Kallusgewebe. Die Möglichkeit der Datierung ergibt sich durch die Bestimmung des ersten Jahrrings, dessen Zellen in die verletzte Stelle einwachsen und/oder kallusartig ausgebildet sind.

Die Überwallung bedeutet ein kreisförmiges Einwachsen der Jahrringe bis zum endgültigen Verschluss der Verletzung. Es ist nur selten möglich, die Stelle des Überwallungsbeginns mit einem Zuwachsbohrer gezielt zu treffen. Sollte die Entnahme von Stammscheiben nicht möglich sein, ist die Entnahme von Bohrkernen aus dem Überwallungsbereich und der Gegenseite der Verletzung notwendig. Bohrkern aus dem Zentrum der Verletzung sind weniger geeignet, da je nach Art der Verletzung Jahrringe fehlen können.

### Wurzelfreilegung

Die Rekonstruktion erosiver Prozesse, die zu Wurzelfreilegungen führen, erfordert ein spezielles Vorgehen sowohl im Gelände als auch bei der Auswertung. Die totale Freilegung (und somit das Absterben) eines Teils des Wurzelsystems führt zu einem Einbruch im Zuwachs des Stammes und kann folglich durch die zuvor erläuterte Beprobung und Jahringauswertung datiert werden. Anders verhält es sich, wenn nur Teile einer oder mehrerer Wurzeln freigelegt werden und diese nicht absterben (GÄRTNER 2003b).

In Erweiterung der bisher erläuterten Kartierung muss hier die direkte Umgebung der Wurzel (Nano- bis Picoskala nach DIKAU 1988) wie auch deren genaue Lage dokumentiert und mit den Eigenschaften des zuvor bestimmten Prozesses der Freilegung abgeglichen werden. Dieses Verfahren ermöglicht einen differenzierteren Blick auf die Art der Freilegung der Wurzel. Je nach Art des Prozesses wird es somit ermöglicht, verschiedene Arten des Milieuwechsels der entsprechenden Wurzel zu bestimmen. Die direkte Umgebung abrupt freigelegter Wurzelbereiche ist nach dem Ereignis häufig destabilisiert und damit in der Folgezeit verschiedenen Sekundärprozessen unterworfen. Diese führen entweder zu einer weiteren Freilegung oder aber zu einer teilweisen Wiedereinbettung der Wurzel durch umgelagertes Material.

Nicht alle Bereiche der durch kontinuierliche Abtragung (z.B. Spülprozesse am Hang) freigelegten Wurzeln werden zur selben Zeit freigelegt. Eine genaue Analyse des Hangprofils erlaubt es abzuschätzen, welche Bereiche zuerst freigelegt wurden. Die Dokumentation der Geländebefunde umfasst neben der Erfassung der bisher erläuterten Daten eine genaue Skizze der Position der Wurzel. Die Struktur der umgebenden Geländeoberfläche (Substratbeschaffenheit, Neigungen und Distanzen) und die Lage des freigelegten Wurzelteils werden unter Angabe der entsprechenden Werte dokumentiert. Die Tiefenlage bezeichnet dabei die Distanz zwischen der Borke (Oberseite der Wurzel) und der Bodenoberfläche.

Soweit das umgebende Substrat Grabungen zulässt, werden zum späteren Vergleich am gleichen Standort ungestörte Wurzeln desselben Baumes oder zumindest der gleichen Baumart entnommen, wobei auch hier die genaue Tiefenlage der Proben dokumentiert werden muss. Grundsätzlich sollte die Beprobung in einem Mindestabstand von etwa 1 m vom Stammansatz durchgeführt werden, um Einflüsse des Stamm-

anlaufes auf die Jahrringausprägung (z.B. Exzentrizität/ Druckholzbildung durch Schwingungen des Stammes) auszu-schliessen (GÄRTNER 2003b).

#### Aufwuchs

Die bisher aufgeführten Möglichkeiten der Probennahme er-folgen, mit Ausnahme der Adventivwurzelbeprobung, im Hin-blick auf eine jahrgenaue Datierung der Ereignisse. In vielen Fällen findet man aber Bäume, die nach den letzten Ereignis-sen im Gebiet aufgewachsen sind und somit nicht durch die zu untersuchenden Prozesse beeinflusst wurden. So zeigen bei-spielsweise Bäume, die in Abflussrinnen oder Lawinenbahnen aufwachsen und keinerlei Störungen aufweisen, an, dass diese Bereiche mindestens seit dem Beginn des Aufwuchses in-aktiv sind. Ziel der Beprobung muss es hier folglich sein, das Alter des betreffenden Baumes zu bestimmen. Dies erlaubt zwar keine Datierung des letzten Ereignisses, ermöglicht aber die Bestimmung eines Mindestalters der zu analysierenden Form. So zeigt das Alter eines in einer Murrinne aufgewach-senen Baumes die minimale Dauer der Inaktivität.

Die Beprobung des Stammes muss in diesem Fall ganz unten in der Nähe des Wurzelansatzes erfolgen. Würde man die Stelle der Probennahme höher am Stamm ansetzen, würde man durch die Art des Baumwachstums nicht alle Jahr-ringe erfassen (SCHWEINGRUBER 1983, 1996). Eventuell auftre-tende Störungen der Jahrringausprägung durch die Wurzel-anläufe sind in diesem Fall zu vernachlässigen. Es hat sich je-doch als sinnvoll erwiesen, zusätzliche Proben in Brusthöhe zu entnehmen, um die endgültige Datierung abzusichern.

### 3. Schlussfolgerungen

Die Kombination einer detaillierten Geländeansprache und Prozessbestimmung mit einer gezielten Baumauswahl und Probennahme ermöglicht durch die anschliessende jahrring-analytische Auswertung eine jahrgenaue Rekonstruktion der zeitlich-räumlichen Dynamik geomorphologischer Prozesse. Gerade im Hinblick auf die Notwendigkeit der Modellierung zukünftiger Prozesse und der damit zusammenhängenden Risikoabschätzungen sind genaue Kenntnisse der bisherigen Systementwicklung unabdingbar. Kennt man die bisherige Dynamik eines Prozesssystems, so lassen sich zuverlässigere Prognosen der künftigen Systementwicklung erstellen.

Die Qualität dendrogeomorphologischer Rekonstruktionen hängt dabei grundlegend von folgenden Voraussetzungen ab:

- Die korrekte Datierung der zu untersuchenden Proben muss gewährleistet sein. Dies macht die Erstellung einer lo-kalen Referenzchronologie für jede zu untersuchende Baumart unumgänglich. Erst der genaue Abgleich der Jahr-ringkurven der gestörten Proben mit einer Chronologie un-gestörter Proben ermöglicht das sichere Erkennen von Ab-weichungen und somit die jahrgenaue Datierung.
- Die genaue Formenanalyse im Gelände bildet den Grund-stein für die spätere Prozessrekonstruktion. Die Jahrring-analyse liefert nur Informationen über Abweichungen vom «normalen» Wachstum der Bäume des Untersuchungs-gebietes. Welcher Prozess allerdings zu diesen Abweichungen führte, kann durch die reine Jahrringanalyse nur einge-schränkt bestimmt werden.

Die Art der Probennahme unterscheidet sich zudem grund-legend von allgemeinen dendrochronologischen und dendro-klimatologischen Fragestellungen. Eine einheitliche Form der Beprobung, wie beispielsweise für dendro-klimatologische Untersuchungen oder die Erstellung der Referenzchronolo-gie, ist hier nicht zweckmässig.

## Zusammenfassung

Die Anwendung der Jahrringanalyse in der Geomorphologie ist im Bereich der zeitlich-räumlichen Prozessrekonstruktion die Methode mit der höchsten zeitlichen Auflösung. Die Da-tierungen und die daraus resultierenden Rekonstruktionen sind jahrgenau, mitunter sogar auf bestimmte Jahreszeiten festzulegen. Um dies zu erreichen, muss man berücksichtigen, dass es bezüglich der Feldmethoden grosse Unterschiede zu anderen jahrringanalytischen Arbeiten gibt. Nach der Stand-ortauswahl erlaubt erst eine gezielte Geländeansprache und Prozessbestimmung im Vorfeld der Beprobung die entspre-chende Auswahl beeinflusster Bäume. Besonderer Wert muss auf die Art der Beprobung gelegt werden. Die Auswahl der Probennahmestellen am Baum erfolgt entsprechend der Art der Störung und der zu erwartenden Reaktion des Baumes und ist somit nicht einheitlich für den jeweiligen Standort, sondern einheitlich für bestimmte Arten der Störung. Um die exakte Datierung der Störungen zu gewährleisten ist es zudem erfor-derlich, eine lokale Referenzchronologie zu erstellen.

## Summary

### Geomorphology and tree rings – field methods in dendrogeomorphology

In terms of the spatiotemporal reconstruction of geomorphic processes the application of tree-ring analysis has the highest level of temporal resolution in geomorphology. Dating and the resulting reconstructions can be assigned to exact calendar years, sometimes even to specific seasons. To guarantee this, one has to take into account that there are great differences between methods in the field and other tree-ring related fields of research. Following site selection a detailed relief analysis and process must be carried out in order to determine and se-lect those trees obviously disturbed by these processes. The method of sampling is of the utmost importance. Selection of the samples must be based on the estimated kind of distur-bance and therefore corresponds to the specific disturbance of a given species and not to the site being investigated. Further-more, in order to be able to accurately date the disturbances it is absolutely essential to produce a local reference chronology.

## Résumé

### Géomorphologie et dendrochronologie: méthodes de terrain en dendrogeomorphologie

L'analyse des cernes des arbres offre la meilleure résolution temporelle dans le domaine de la reconstruction spatio-tem-porelles des processus géomorphologiques. La datation et la reconstruction qui en résulte sont précises à l'année, voire à la saison près. Un tel degré de précision implique l'utilisation de méthodes de terrain sensiblement différentes de celles mises en œuvre dans d'autres champs d'application de la dendro-chronologie. Après le choix du site, la première étape avant la sélection des arbres à échantillonner consiste à étudier soi-gneusement le relief et à déterminer les processus géomor-phologiques en jeu. En particulier les modalités de carottage doivent faire l'objet du plus grand soin. Le choix de l'emplace-ment du carottage dépend du type de perturbation et de la ré-action prévisible de l'arbre. Il n'est donc pas déterminé de ma-nière uniforme pour l'ensemble d'un site, mais pour un type de perturbation donné. Enfin, la datation exacte d'une perturba-tion nécessite impérativement qu'une chronologie locale de référence soit calculée à partir des chronologies des arbres échantillonnés.

Traduction: MICHÈLE KAENNEL DOBBERTIN



## Literatur

- ALESTALO, J. 1971: Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia, Soc. Geog. Fenniae* 105: 1–140
- BANNAN, M.W. 1941: Variability in root structure in roots of native Ontario conifers. *Bulletin Torrey Botanical Club* 68: 173–194.
- 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.
- BÉGIN, Y. 2000. Ice-push disturbances in high-Boreal and Subarctic lakeshore ecosystems since AD 1830, northern Québec, Canada. *The Holocene* 10, 2: 179–189.
- BÉGIN, Y.; LANGLAIS, D.; COURNOYER, L. 1991a: Tree-Ring Dating of Shore Erosion Events (Upper St. Lawrence Estuary, Eastern Canada). *Geografiska Annaler* 73A, 1: 53–59.
- BÉGIN, Y.; LANGLAIS, D.; COURNOYER, L. 1991b: A dendrogeomorphic estimate of shore erosion, upper St. Lawrence estuary, Quebec. *Journal of Coastal Research* 7, 3: 607–615.
- BÉGIN, C.; FILION L. 1988: Age of landslides along the Grande Rivière de la Baleine estuary, eastern coast of Hudson Bay, Québec (Canada). *Boreas* 17: 289–299.
- BÉGIN, Y.; PAYETTE, S. 1988. Dendroecological evidence of lake-level changes during the last three centuries in subarctic Quebec. *Quaternary Research* 30: 210–220.
- BRAAM, R.R.; WEISS, E.E.J.; BURROUGH, A. 1987a: Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena* 14: 573–584.
- BRAAM, R.R.; WEISS, E.E.J.; BURROUGH, A. 1987b: Dendrogeomorphological analysis of mass movement: A technical note on the research method. *Catena* 14: 585–589.
- BRÄUNING, A. 1995: Zur Anwendung der Dendrochronologie in den Geowissenschaften. *Die Erde* 126: 189–204.
- BROWN, P.M.; KAYE, M.W.; BUCKLEY, D. 1999: Fire history in Douglas-fir and coast redwood forests at Point Reyes National Seashore, California. *Northwest Science* 73, 3: 205–216.
- BURGER, H. 1930: Bodenveränderung und Wurzelbildung. *Schweiz. Z. Forstwes.* 81: 67–71.
- BUTLER, D.R.; OELFKE, J.G.; OELFKE, L.A. 1986: Historic rockfall avalanches, northeastern Glacier National Park, Montana, U.S.A.. *Mountain Research and Development* 6, 3: 261–271.
- CANNONE, N.; GERDOL, R. 2003: Vegetation as an Ecological Indicator of Surface Instability in Rock Glaciers. *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 35, 3: 384–390.
- CARRARA, P.E. 1979: The determination of snow avalanche frequency through tree-ring analysis and historical records at Ophir, Colorado. *Geological Society of America Bulletin* 90: 773–780.
- CARRARA, P.E.; CARROLL, T.R. 1979: The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. *Earth Surface Processes* 4: 307–317.
- CHERUBINI, P.; SCHWEINGRUBER, F.H.; FORSTER, T. 1997: Morphology and ecological significance of intra-annual radial cracks in living conifers. *Trees* 11: 216–222.
- COOK, E.R.; KAIRIUKSTIS, L.A. (Eds.) 1990: *Methods of Dendrochronology: Application in the Environmental Science*. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 394 p.
- CUTLER, D.F. 1988: Kew after the Strom: New Research. *The Biologist* 35: 239–243.
- CUTLER, D.F. 1978: Survey and Identification of Tree Roots. *Arboricultural Journal* 3: 243–246.
- CUTLER, D.F. 1976: Variation in Root Wood Anatomy. *Leiden Botanical Series* 3: 143–156.
- CUTLER, D.F.; GASSON, P.E.; FARMER, M.C. 1989: The wind blown tree root survey: Preliminary results. *Arboricultural Journal* 13: 219–242.
- CUTLER, D.F.; RICHARDSON, I.B.K. 1989: *Tree Roots and Buildings*. 2nd Edition. Longman, Harlow, Essex.
- CUTLER, D.F.; RUDALL, P.J.; GASSON, P.E.; GALE, R.M.O. 1987: *Root Identification Manual of Trees and Shrubs*. Chapman and Hall, London, 245 p.
- DANZER, S.R. 1996: Rates of slope erosion determined from exposed roots of ponderosa pine at Rose Canyon Lake, Arizona. In: Dean, J.; Meko, D.M.; Sewtnam, T.W. (Eds.): *Tree Rings, Environment, and Humanity*. Proceedings of the international conference, Tucson, Arizona, 17–21 May 1994, Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, Arizona. Radiocarbon: 671–678.
- DENNELER, B.; SCHWEINGRUBER F.H. 1993: Slow mass movement. A dendro-geomorphological study in Gams, Swiss Rhine Valley. *Dendrochronologia* 11: 55–67.
- DESPLANAQUE, C.; ROLLAND, C.; SCHWEINGRUBER, F.H. 1999: Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation. *Trees* 13: 218–227.
- DEY, D.C.; GUYETTE, R.P. 2000. Anthropogenic fire history and red oak forests in south-central Ontario. *Forestry Chronicle* 76, 2: 339–347.
- DIKAU, R. 1988: Entwurf einer geomorphographisch-analytischen Systematik von Reliefseinheiten. *Heidelberger Geographische Bausteine* 5, Geographisches Institut, Universität Heidelberg, 45 S.
- DUNNE, T.; DIETRICH, W.E.; BRUNENGO, J. 1978: Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplement* 29: 130–140.
- EARDLEY, A.J. 1967: Rate of denudation as measured by bristlecone pines, Cedar Breaks, Utah. *Utah Geological and Mineralogical Survey, Special Studies* 21, 13 p.
- ESPER, J.; GÄRTNER, H. 2001: Interpretation of Tree-Ring Chronologies. *Erdkunde* 55, 3: 277–288.
- FANTUCCI, R. 1999: Dendrogeomorphology in landslide analysis. In: Casale, R.; Margottino, C. (Eds.): *Floods and Landslides*, Springer, Berlin: 69–81.
- FANTUCCI, R.; MCCORD, A. 1995: Reconstruction of landslide dynamic with dendrochronological methods. *Dendrochronologia* 13: 1–22.
- FILION, L.; QUINTY, F.; BEGIN, C. 1991: A chronology of landslide activity in the valley of the Rivière du Gouffre, Charlevoix, Quebec. *Canadian Journal of Earth Science* 28: 250–256.
- FRITTS, H.C. 1976: *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 p.
- 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, Proceedings of the Dendrosymposium 2002, April 11th–13th 2002, Bonn/Jülich: 120–124.
- GÄRTNER, H. 2003b: Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse. *Dissertationes Botanicae* 378, 118 S.
- GÄRTNER, H.; HITZ, O.; MONBARON, M. 2003b: Jahrringanalytische Rekonstruktion von Ufererosion und Schwemmholaufkommen in Schweizer Wildbächen. *FAN-Agenda* 2: 16–17.
- 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: 81–91.
- GÄRTNER, H.; STOFFEL, M. 2002: Detailed mapping and dendrogeomorphological analysis of a debris flow torrent in Switzerland. In: *Interpraevent 2002 in the Pacific Rim*, Congress Publication 1: 199–207.
- GÄRTNER, H.; STOFFEL, M.; LIÈVRE, I.; MONBARON, M. 2003a: 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* 1: 207–217.
- GERS, E.; FLORIN, N.; GÄRTNER, H.; GLADE, T.; DIKAU, R.; SCHWEINGRUBER, F.H. 2001: Application of shrubs for dendrogeomorphological analysis to reconstruct spatial and temporal landslide movement patterns. A preliminary study. In: Dikau, R.; Schmidt, K.-H. (Eds.): *Mass Movements in South, West and Central Germany*. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplement* 125: 163–175.
- GSTEIGER, P. 1993: Steinschlagschutzwald. Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung. *Schweiz. Z. Forstwes.* 144, 2: 115–132.
- GUTSELL, S.L.; JOHNSON, E.A. 1996: How fire scars are formed: coupling a disturbance process to its ecological effect. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 166–174.
- HELLEY, E.J.; LAMARCHE, V.C. 1968: December 1964, a 400-year flood in Northern California. *US Geological Survey Professional Paper* 600-D: D34–D37.
- HUPP, C.R. 1984: Dendrogeomorphic Evidence of Debris Flow Frequency and Magnitude at Mount Shasta, California. *Environmental Geology and Water Science* 6, 2: 121–128.
- HUPP, C.R.; OSTERKAMP, W.R.; THORNTON, J.L. 1987: Dendrogeomorphic Evidence and Dating of Recent Debris Flows on Mount

- Shasta, Northern California. U.S. Geological Survey Professional Paper 1396-B, 39 p.
- JACOBY, G.C.; WILLIAMS, P.L.; BUCKLEY, B.M. 1992: Tree ring correlation between prehistoric landslides and abrupt tectonic events in Seattle, Washington. *Science* 258: 1621–1623.
- JAKOB, M. 1995: Dendrochronology to measure average movement rates of gelifluction lobes. *Dendrochronologia* 13: 141–146.
- KRAUSE, C.; ECKSTEIN, D. 1993: Dendrochronology of roots. *Dendrochronologia* 11: 9–23.
- KRAUSE, C.; MORIN, H. 1999: Root growth and absent rings in mature black spruce and balsam fir, Quebec, Canada. *Dendrochronologia* 16-17: 21–35.
- LAMARCHE, V.C. 1968: Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California. US Geological Survey Professional Paper 352-I: 376 S.
- LAMARCHE, V.C. 1966: An 800-year History of Stream Erosion as Indicated by Botanical Evidence. U.S. Geological Survey Professional Paper 550-D: D83-D86.
- LAMARCHE, V.C. 1963: Origin and Geologic Significance of Buttress Roots of Bristlecone Pine, White Mountains, California. U.S. Geological Survey Professional Paper 475-C: C148–C149.
- LAMARCHE, V.C. 1961: Rate of slope erosion in the White Mountains, California. *Geological Society of America, Bulletin* 72: 1579–1580.
- LATELTIN, O.; BEER, C.; RAETZO, H.; CARON, C. 1997: Landslides in Flysch terranes of Switzerland: Causal factors and climate change. *Eclogae Geologicae Helveticae* 90, 3: 401–406.
- LEPAGE, H.; BÉGIN, Y. 1996: Tree-ring dating of extreme water level events at Lake Bienville, Subarctic Québec, Canada. *Arctic and Alpine Research* 28, 1: 77–84.
- MARIN, P.; FILION, L. 1992: Recent dynamics of subarctic dunes as determined by tree-ring analysis of white spruce, Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research* 38: 316–330.
- MATTHECK, C. 1993: Design in der Natur. *Rombach Wissenschaft, Reihe Ökologie* 1, 242 S.
- MORNEAU, C.; PAYETTE, S. 1998: A dendroecological method to evaluate past caribou (*Rangifer tarandus* L.) activity. *Ecoscience* 5, 1: 64–76.
- NILAWEEA, N.S.; NUTALAYA, P. 1999: Role of tree roots in slope stabilisation. *Bulletin of Engineering Geology Environment* 57: 337–342.
- NORMAN, S.A.; SCHAETZL, R.J.; SMALL, T.W. 1995: Effects of slope angle on mass movement by tree uprooting. *Geomorphology* 14: 19–27.
- RIGLING, A.; BRÄKER, O.; 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, 1: 105–121.
- ROER, I.; GÄRTNER, H.; DIKAU, R. 2003: Bioindikation von Blockgletschersystemen im Turtmanntal (Wallis, Schweiz). 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 1: 132.
- ROSEN, E.; CHEN, R.; MASSON, P.H. 1999: Root gravitropism: a complex response to a simple stimulus? *Trends in Plant Science Reviews* 4, 10: 407–412.
- SANIO, K. 1873: Anatomie der gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*). In: Pringsh. Jahrbuch für wissenschaftliche Botanik 9: 50–64.
- SANIO, K. 1872: Über die Grösse der Holzzellen bei der gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*). *Pringsh. Jahrbuch für wissenschaftliche Botanik* 8: 401–420.
- SCHMID, D.; SCHWEINGRUBER, F.H. 1995: Datierung und Nachweis von Rutschungen mit Hilfe von Jahrringen. Eine dendrogeomorphologische Studie im Rutschungsgebiet Brunjini, Oberwallis. *Schweiz. Z. Forstwes.* 146, 8: 641–659.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 2001: Dendroökologische Holzanatomie. Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf (Hrsg.), Haupt, Bern, 472 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1990: Anatomie europäischer Hölzer: ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum-, Strauch- und Zwergstrauchhölzer. *Anatomy of European Woods*. Haupt, Bern, 800 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1996: Tree Rings and Environment. *Dendroecology*. Haupt, Bern, 609 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1983: Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Haupt, Bern, 234 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1978: Mikroskopische Holzanatomie. Formspektren mitteleuropäischer Stamm- und Zweighölzer zur Bestimmung von rezemem und subfossilem Material. Birmensdorf, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 226 S.
- SHRODER, J.F. 1980: Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4: 161–188.
- SHRODER, J.F. 1978: Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research* 9: 168–185.
- SIGAFOOS, R.H. 1964: Botanical evidence of floods and floodplain deposition. US Geological Survey Professional Paper 485-A, 35 p.
- SITTE, P.; ZIEGLER, H.; EHRENDORFER, F.; BRESINSKY, A. (Hrsg.) 1998: Strasburgers Lehrbuch der Botanik. Fischer, Stuttgart, 1007 S.
- STRUNK, H. 1997: Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena* 31: 137–151.
- STRUNK, H. 1995: Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Murfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung. *Theorie und Forschung*, Bd. 317, *Geographie* 1, Roderer, Regensburg, 196 S.
- STRUNK, H. 1992: Reconstructing debris flow frequency in the southern Alps back to AD 1500 using dendrogeomorphological analysis. In: Walling, D.E.; Davies, T.R.; Hasholt, B. (Eds.): *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*. IAHS Publication 209: 299–306.
- STRUNK, H. 1991: Frequency distribution of debris flow in the Alps since the «Little Ice Age». *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplement* 83: 71–81.
- STRUNK, H. 1990: Murgänge als Naturgefahren – Frequenzanalysen mit dendro-chronologischen Methoden. In: Semmel, A. (Ed.): *47. Deutscher Geographentag Saarbrücken 1989, Tagungsberichte und wissenschaftliche Abhandlungen*.
- STRUNK, H. 1989a: Dendrogeomorphology of debris flows. *Dendrochronologia* 7: 15–25.
- STRUNK, H. 1989b: Episodische Murschübe in den Pragser Dolomiten – semiquantitative Erfassung von Frequenz und Transportmenge. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplement* 70: 163–186.
- TESSIER, L.; GUIBAL, F.; SCHWEINGRUBER, F.H. 1997: Research Strategies in Dendroecology and Dendroclimatology in Mountain Environments. *Climatic Change* 36: 499–517.
- WATSON, A.; PHILLIPS, C.; MARDEN, M. 1999: Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. *Plant and Soil* 217: 39–47.
- WESTING, A.H. 1965: Formation and function of compression wood in gymnosperms II. *Botanical reviews* 34: 51–78.
- WIMMER, R.; VETTER, R.E. (Eds.) 1999: *Tree-Ring Analysis. Biological, Methodological and environmental Aspects*. Cabi Publishing, New York, 302 p.
- YAMAGUCHI, D.K.; ATWATER, B.F.; BUNKER, D.E.; BENSON, B.E.; REID, M.S. 1997: Tree-ring dating the 1700 Cascadia earthquake. *Nature* 389: 922–923.
- ZHOU, Y.; WATTS, D.; CHENG, X.; LI, Y.; LUO, H.; XIU, Q. 1997: The traction effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on soil reinforcement: a direct *in situ* test. *Plant and Soil* 190: 77–86.
- ZHOU, Y.; WATTS, D.; LI, Y.; CHENG, X. 1998: A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. *Forest Ecology and Management* 103: 107–120.
- ZOLTAI, S.C. 1975: Tree ring record of soil movements on permafrost. *Arctic and Alpine Research* 7, 4: 331–340.

#### Dank

Gedankt wird Peter Brang, Otto Ulrich Bräker und Andreas Rigling für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Die Autoren wurden gefördert durch die Projekte Rookey (Nr. C00.0067, H. Gärtner), ISONET (BBW-Nr. 01.0499-1; J.Esper) und ALPIMP (BBW-Nr. 01.0498-1; K.Treydte).

#### Autoren und Autorin

Dr. HOLGER GÄRTNER\*, Dr. JAN ESPER und Dr. KERSTIN TREYDTE, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf. \*Korrespondenz, E-Mail: gaertner@wsl.ch.