

Erosionsrekonstruktion aufgrund anatomischer Veränderungen in Eschenwurzeln

Oliver Markus Hitz Labor für Dendrogeomorphologie, Universität Freiburg (CH)*
Holger Gärtner Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (CH)
Ingo Heinrich Labor für Dendrogeomorphologie, Universität Freiburg (CH)
Michel Monbaron Labor für Dendrogeomorphologie, Universität Freiburg (CH)

Reconstruction of erosion dynamics with exposed roots of European ash

Global climatic changes affect fluvial processes, such as erosion, on forested slopes and riverbanks. Both the continuous and discontinuous erosion of riverbanks often lead to destabilized and uprooted tree stems. Dating of the stem-wood grown along riverbanks in combination with dendrogeomorphic analysis help to reconstruct the erosion dynamics. The current study analyses the anatomical wood features of exposed roots from European ash (*Fraxinus excelsior* L.). First results show different reactions in vessel and fiber cell growth: fiber cells show a distinct decrease in lumen width due to the exposure, whereas vessel lumens show a higher variation in width. The results demonstrate that with European ash it is possible to determine the time of exposure at an annual resolution.

Keywords: Root exposure, dendrogeomorphology, riverbank erosion, wood anatomy, torrents, *Fraxinus excelsior*
doi: 10.3188/szf.2008.0XXX

* Universität Freiburg, Geographie, Labor für Dendrogeomorphologie, Chemin du Musée 4, CH-1700 Freiburg, oliver.hitz2@unifr.ch

In den letzten Jahrzehnten wurde die Schweiz mehrfach von grösseren Naturereignissen heimgesucht. Neben Lawinen treten in alpinen Regionen verschiedene geomorphologische Prozesse wie Rutschungen und Murgänge auf, die sich zu Schadenereignissen entwickeln können. Diese stehen oft in Zusammenhang mit Starkniederschlägen oder mit einem grossen Angebot an Schmelzwasser. Im Zuge der Klimaerwärmung (Solomon et al 2007) wird davon ausgegangen, dass das Risikopotenzial von Naturgefahren in alpinen Gebieten zunehmen wird (Planat 2004). Speziell fluviale Prozesse in Wildbächen, welche Erosion in den Einhängen und Uferpartien bewaldeter Einzugsgebiete verursachen, werden direkt beeinflusst. Dies offenbart die Notwendigkeit, das Erosionsverhalten von Wildbächen und ihre Transportkapazität detailliert zu untersuchen.

Sowohl die langsame, kontinuierliche wie auch die ereignisartige, diskontinuierliche Erosion in bewaldeten Uferbereichen führt zur Destabilisierung von Bacheinhängen und somit zum Einkippen von ufernahen Bäumen. In der Folge treten häufig Rutschungen auf, die den Baumbestand weiter destabilisieren. Wegen dieser Prozesse geraten oft ganze Bäume als Schwemmholz ins Gerinne und führen dort zu Verkläuerungen. Ein Bruch dieser Verkläuerungen kann zu Überschwemmungen oder Murgängen führen. Die Beurteilung der Eintretenswahr-

scheinlichkeit solcher Ereignisse erfordert neben der Untersuchung der Einzugsgebiete auch die Analyse verschiedenster Parameter entlang der Transportstrecke der Wildbäche (Buwal 1998).

Dendrogeomorphologie (Alestalo 1971) befasst sich mit Wachstumsstörungen in Jahrringen zur Datierung geomorphologischer Prozesse und rekonstruiert ihre zeitliche und räumliche Ausdehnung (Gärtner 2007a). Die Jahrringanalyse wurde in vielen Untersuchungen angewendet, um das Kalenderjahr oder sogar die Jahreszeit geomorphologischer Ereignisse zu ermitteln (Schweingruber 1996). Mehrheitlich konzentrierten sich diese Untersuchungen auf die Analyse des Stammholzes, nur selten wurden auch Wachstumsveränderungen in Wurzeln berücksichtigt (Gärtner et al 2004). Speziell im Hinblick auf die Rekonstruktion erosiver Prozesse rücken nun die Wurzeln verstärkt in den Fokus dendrogeomorphologischer Untersuchungen; dies darum, weil die Wurzeln unmittelbar auf Veränderungen ihrer direkten Umgebung reagieren (Fayle 1968). Erste Ansätze zur detaillierten Erosionsrekonstruktion mittels freigelegten Wurzeln basierten auf der Ermittlung des Alters der freigelegten Wurzel und der Distanz zwischen dem Wurzelzentrum und der aktuellen Bodenoberfläche (LaMarche 1963, 1968, Dunne et al 1978). Fayle (1968) deckte erstmals strukturelle Veränderungen der Wurzeljahrringe auf. Diese sahen als Folge erosionsbedingter Freilegung

der Wurzel stammähnlich aus. Weiter wurde der Freilegungszeitpunkt auch aufgrund von Verletzungen und der daraus resultierenden Überwallungsreaktionen bestimmt (Carrara & Carroll 1979, Danzer 1996, Morneau & Payette 1998). Gärtner et al (2001) konnten zeigen, dass mit holzanatomischen Untersuchungen der Freilegungszeitpunkt von Koniferenwurzeln datiert werden kann. Dies ist möglich, weil die Frühholztracheiden (grosslumige, dünnwandige Zellen, die zu Beginn der Vegetationsperiode gebildet werden) auf eine Freilegung mit einer andauernden Grössenreduktion um rund 50% reagieren (Gärtner 2003). Zudem wurde deutlich, dass ein Strukturwechsel zu einem eher stammähnlichen Erscheinungsbild der Koniferenwurzeln bereits vor der Freilegung einsetzt. Da dieser Prozess von der Tiefenlage der Wurzel abhängig ist, können verschiedenste Erosionsprozesse detailliert rekonstruiert werden (Gärtner 2002, 2007b). Diese Erkenntnisse wurden bereits mehrfach erfolgreich in der Erosionsforschung eingesetzt (Bodoque et al 2005, Pelfini & Santilli 2006).

Im Gegensatz zu den Nadelhölzern, die zu über 90% aus Tracheiden aufgebaut sind, welche die Leit- und Stützfunktion übernehmen, ist die anatomische Struktur der Laubhölzer wesentlich komplexer. Der überwiegende Anteil des Laubholzes besteht aus Tracheen (Gefässe = Leitgewebe) und Faserzellen (Libriformfasern und Fasertracheiden = Stützgewebe). Die Gefässe sind je nach Laubholzart unterschiedlich im Jahrring verteilt (zerstreutporig, ringporig, halbringporig). Deren Anordnung ist ein wichtiges Bestimmungsmerkmal.

Ähnlich wie bei den Nadelhölzern zeigt das untersuchte Wurzelholz der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) deutliche Unterschiede zum Stammholz. Diese betreffen die Porigkeit, die Ausbildung der Thyllen, den grösseren Anteil an Parenchym (Speichergewebe) und ein kleinerer Faseranteil in den Wurzeln. Wurzeln weisen zudem oft weniger Zellen in den Jahrringen (kleinerer Radialzuwachs), weniger deutlich ausgeprägte Jahrringgrenzen und grössere Zellen mit dünneren Zellwänden auf.

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, wie Eschenwurzeln auf eine Freilegung reagieren und ob diese holzanatomischen Veränderungen für die Rekonstruktion von Erosionsprozessen in Wildbächen verwendet werden können. Anhand der bekannten Freilegungsreaktionen von Fichtenwurzeln (*Picea abies* [L.] Karst.) wird die Ereignisdatierung an den Eschenwurzeln verifiziert.

Material und Methoden

Zwei Wildbäche, der Brüggenwaldbach (Gersau, Kanton Schwyz) und der Steinibach (Schüpfheim, Kanton Luzern) wurden als Untersuchungs-

objekte ausgewählt. Beide Bäche zeichnen sich aus durch eine grosse fluviale Dynamik, steile Einhänge, ein Einzugsgebiet zwischen 1 km² und 10 km², ufernahe Bäume und das Vorhandensein von Wurzeln, welche durch fluviale Erosion freigelegt wurden. Die Bestockung entlang der Bäche ist aus Nadel- und Laubbäumen zusammengesetzt. Damit sind die Voraussetzungen gegeben, dass sowohl Nadel- als auch Laubholz wurzeln gefunden werden können, die nahe beieinander liegen und durch dasselbe Ereignis freigelegt wurden. In diesem Fall können die freigelegten Fichtenwurzeln als Referenz (bekannte Freilegungsreaktion) für die Bestimmung der Freilegungsreaktion in Eschenwurzeln genutzt werden.

Bei beiden Wildbächen wurde entlang der Rinne eine Strecke von einem Kilometer für die Untersuchung ausgewählt. Erosionsbereiche, welche freigelegte Wurzeln aufwiesen, wurden detailliert aufgenommen. Die Detailaufnahmen dokumentieren die Dimension und die Ausrichtung der Wurzeln sowie deren Position relativ zur aktuellen Bodenoberfläche (Abbildung 1).

Den freigelegten Wurzeln wurden mindestens 3 Proben entnommen, wobei jede Probe aus zwei identischen Wurzelscheiben besteht. Die Probeentnahme erfolgte mindestens einen Meter vom Stammansatz entfernt, da die Freilegung der Wurzel nahe des Stammes auch durch sekundäres Dickenwachstum verursacht werden kann (Gärtner 2007b). Zudem sollten mechanische Beeinflussungen durch den Stamm (Stabilisierungseffekt) ausgeschlossen werden.

Insgesamt wurden 61 Fichtenwurzeln (von 59 Bäumen) und 18 Eschenwurzeln (von 12 Bäumen) in die Untersuchung einbezogen, wobei 99 Fichtenproben (von 183 entnommenen Proben) und 25 Eschenproben (von 54) analysiert wurden.

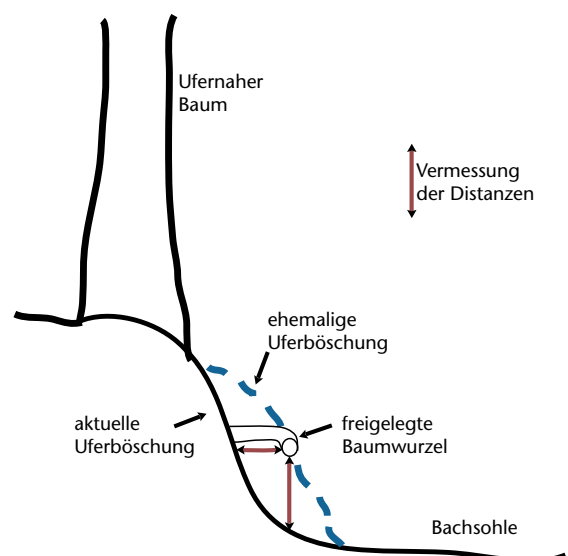


Abb 1 Typische Situation eines Uferbereiches mit einer freigelegten Baumwurzel. Die Abbildung illustriert die Vermessungen (Pfeile) und die vermutete Bodenoberfläche vor der Freilegung (gestrichelte Linie).

Jeweils eine der zwei Wurzelscheiben pro Probe diente der makroskopischen Analyse der Jahrringbreitenvariation. Von der zweiten wurden Dünnschnittpräparate zur mikroskopischen Analyse der anatomischen Strukturen angefertigt (Gärtner et al 2001). Die Oberflächen der Wurzelscheiben wurden im Labor geschliffen. Die Datierung erfolgte durch einfache Jahrringzählung in vier Radien. Sofern die Wurzelscheiben Wunden aufwiesen, wurde damit der Freilegungszeitpunkt der Wurzel datiert (Schweingruber 1996). Ansonsten wurden auf der identischen zweiten Wurzelscheibe geeignete Stellen für die Anfertigung von Dünnschnittpräparaten für die holzanatomischen Analysen bestimmt (Abbildung 2). Die Dünnschnitte wurden mit einem Schlittenmikrotom in einer Dicke von 15 µm angefertigt, anschliessend mit Safranin und Astrablau eingefärbt und mit Kanadabalsam fixiert (Schweingruber 1978). Die Dünnschnittpräparate wurden für die digitale Bildanalyse mit einer Mikroskopkamera fotografiert. Die Zelldimensionen (Zelllumina, Zellwandstärken) wurden mit dem automatischen Bildanalyse-Programm WinCELL (Regent Instruments, WinCELL Pro 2005a) vermessen.

Die Zelldimensionen der Frühholztracheiden von Fichtenwurzeln wurden in jedem Jahrring auf einer Fläche von 0.5 mm² vermessen und Mittelwerte berechnet. Neben dem generellen Aussehen und den detaillierten Vermessungen wurden spezielle Erscheinungen, wie beispielsweise das Vorkommen von traumatischen Harzkanälen bei den Fichtenwurzeln, notiert.

Die Vermessungsprozedur der Eschenwurzeln war ähnlich wie bei den Fichtenwurzeln, sie wurde jedoch der baumartspezifischen Holzanatomie angepasst. Die Analysen konzentrierten sich damit auf mögliche Veränderungen in der Grösse und Ver-

teilung von Gefässen und auf die Dimension der Faserzellen im Früh- und Spätholz. Die Faserzellen wurden auf einer Fläche von 1 mm², welche Früh- und Spätholz umfasst, vermessen. In den definierten Sektoren wurden die Zelllumina von 500 bis 2000 Faserzellen vermessen und anschliessend gemittelt. Für die Vermessung der Gefässe wurden alle Gefässe jedes Jahrringes, die im Dünnschnitt erkennbar waren, analysiert.

Ergebnisse

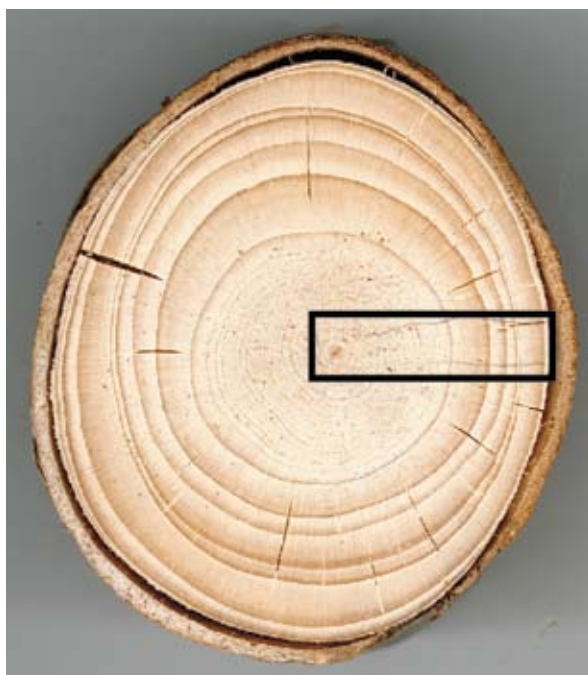
Anhand von einer Fichten- und zwei Eschenwurzeln werden stellvertretend für alle anderen Proben, die analysiert werden konnten, die holzanatomischen Veränderungen dargestellt.

Die Fichtenwurzel (Abbildung 3) zeigt eine abrupte Reduktion des Zelllumens der Frühholzzellen im Jahr 1990: Die ersten Zellreihen des Jahres 1990 weisen Zelllumina auf, die vergleichbar mit denjenigen von 1989 und früher sind (Dünnschnittpräparat in Abbildung 3). Die nachfolgenden Zellreihen weisen eine kontinuierliche Reduktion der Zelllumina bis ins Spätholz auf. Nach 1990 sind die Zelllumina der Frühholztracheiden deutlich und andauernd reduziert. Im Jahr 1991 beträgt die Reduktion des mittleren Zelllumens des gesamten Frühholzes ca. 60% in Bezug auf das langjährige Mittel von 1494 µm² zwischen 1958 und 1989. Eine solche holzanatomische Veränderung wurde von Gärtner et al (2001) als Freilegungsreaktion beschrieben.

Auch die freigelegte Eschenwurzel zeigt einen Wechsel in der strukturellen Beschaffenheit (Dünnschnitt, Abbildung 4). Die Faserzellen der inneren Jahrringe weisen dünnere Zellwände und grössere Zelllumina auf; zudem ist es schwierig, zwischen Früh- und Spätholz zu unterscheiden. Weil die Faserzellen reduziert und die Zellwände verdickt sind, erscheinen die äusseren Jahrringe dunkler als die inneren. Im Gegensatz zu den innersten Jahrringen ist ein deutlicher Unterschied zwischen Früh- und Spätholz auszumachen.

Darüber hinaus sind Unterschiede zwischen den inneren und den äusseren Jahrringen in Bezug auf die Verteilung, Anzahl und Grösse der Gefässe feststellbar: Bei den äusseren Jahrringen konzentrieren sich die grossen Gefässe entlang der Jahrringgrenze im Frühholzbereich (rechte Vergrösserung in Abbildung 4). Zentrumsnah sind die Anzahl der Gefässe und deren Lumenfläche grösser als nahe der Borke. Die Verteilung der Gefässe ist zentrumsnah halbringporig, oft auch zerstreutporig und selten ringporig. Die Spätholzgefässe sind teilweise beinahe so gross wie die Frühholzgefässe, während das Spätholz der äusseren Jahrringe durch kleine Gefässe geprägt ist. Die Jahrringe nahe der Borke sind typisch ringporig.

Abb 2 Mit Sandpapier geschliffene Wurzelscheibe (Querschnitt) einer Fichte (*Picea abies* [L.] H. Karst.). Das Rechteck bezeichnet die für die Dünnschnittprobe vorgesehene Fläche.



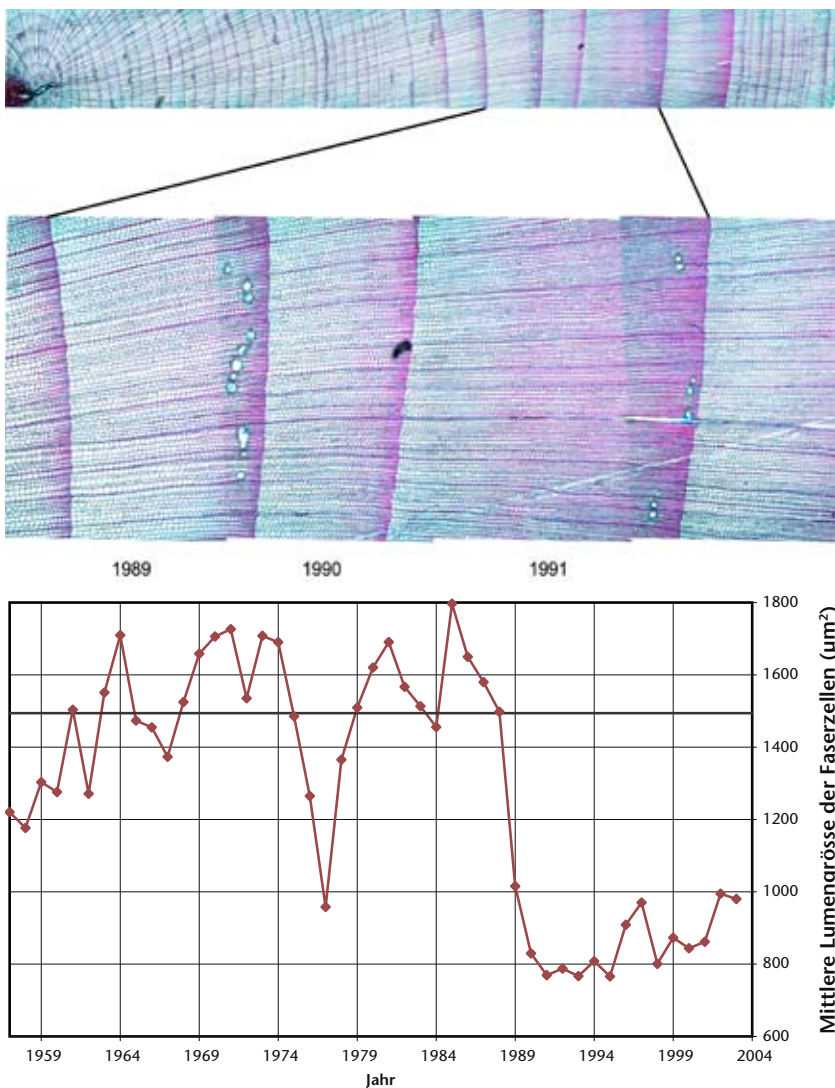


Abb 3 Analyse einer freigelegten Fichtenwurzel (Referenzwurzel). Oben: Dünnschnittpräparat der Fichtenwurzel vom Zentrum (1958) bis zur Borke (2004). Mitte: Ausschnitt aus dem Dünnschnittpräparat, das die Jahre 1989 bis 1991 zeigt. Unten: Jahresmittelwerte der Zelllumina von Frühholztracheiden, die auf einer Fläche von 0.5 mm² pro Jahrring vermessen wurden. Die Vermessungen zeigen im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1958 bis 1989 (schwarze horizontale Linie) eine deutliche, andauernde Reduktion der Zellgrößen nach 1990. Kurz andauernde Reduktionen wie diejenige von 1978 sind meist in extrem schmalen Jahrringen begründet, die entsprechend kleine Zellen ausbilden.

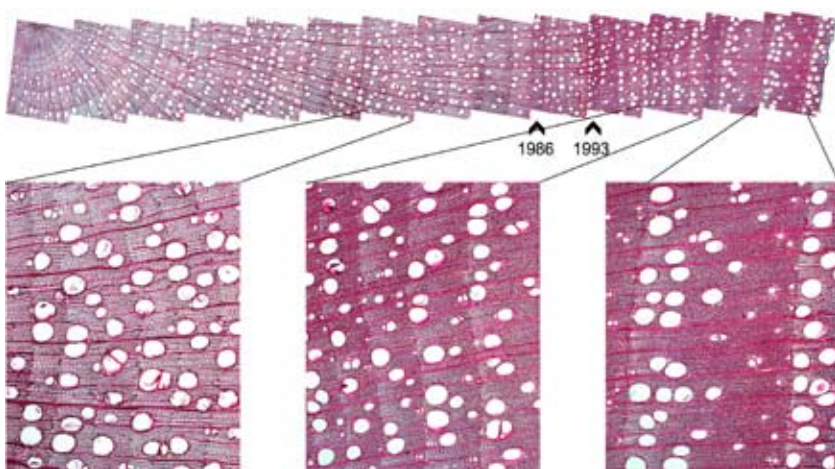


Abb 4 Dünnschnitt einer freigelegten Eschenwurzel (*Fraxinus excelsior* L.). Detaillierte Aufnahmen nahe des Zentrums (links), dazwischen und nahe der Borke (rechts). Die allgemeine Struktur erscheint nahe der Borke dunkler und die Verteilung der Gefässe ändert sich vom inneren zum äusseren Teil. Die Pfeile weisen auf Jahre mit strukturellen Veränderungen hin.

Um diese Beobachtungen bezüglich der Veränderungen der Zellgrößen zu untersuchen, wurden die Gefässe und die Faserzellen getrennt vermessen. Die Vermessungen zeigen als deutlicher Trend den plötzlichen Einbruch der Lumenfläche der Faserzellen (Abbildung 5), eine Reaktion, die derjenigen der Tracheiden aus den Nadelholzwurzeln gleicht. In Abbildung 5 sind zwei Phasen mit reduzierter Lumenfläche der Faserzellen ersichtlich (dunkle Linie), die erste Phase in den Jahren 1986 und 1987 und die zweite Phase nach 1993. Nach 1993 bleibt die Reduktion des mittleren Lumens der Faserzellen stabil um die 50%. Eine solche anhaltende Reduktion des Zelllumens ist bei den Gefässen nicht auszumachen. Die Werte der Gefässlumina (helle Linie) lassen zwar ebenfalls zwei Reduktionen erkennen, eine im Jahr 1987 und eine zweite 1993, die Werte steigen jedoch nach 1993 wieder deutlich an.

Abbildung 6 zeigt die mittleren Faserzelllumina einer anderen freigelegten Eschenwurzel. Im Jahr 1997 erreicht das mittlere Faserzelllumen eine Reduktion um ca. 60% im Vergleich zum langjährigen Mittel der Jahre 1960 bis 1986 von 197 µm². In den Jahren 1968 und 1987 treten ebenfalls kleinere Reduktionen auf, sie sind jedoch meist auf ein Jahr begrenzt. Auch ist der jeweilige Jahrring schmal und besteht nur aus wenigen Zellreihen und entsprechend kleinen Zellen. Im Gegensatz zu den zuvor gezeigten Beispielen einer freigelegten Fichtenwurzel (Abbildung 3) und einer Eschenwurzel (Abbildungen 4 und 5), welche eine abrupte Reduktion der Zelllumina aufweisen, zeigt diese Probe in den Jahren 1993 bis 1997 eine kontinuierliche Reduktion der mittleren Faserzelllumina.

Eine Datierung war bei 23 von 25 Eschenproben möglich (92%). Bei vier Proben wurde dabei der Freilegungszeitpunkt dank einer vorhandenen Wunde datiert, bei 19 Proben konnte eine Reduktion der Faserzellen datiert werden. Bei der Fichte konnten 72 von 99 Proben datiert werden (72%; Tabelle 1).

Diskussion

Um zu prüfen, ob die festgestellten holzanatomischen Veränderungen der Eschenwurzeln auf eine Freilegung zurückzuführen sind, wurden die Wurzeln von Fichte und Esche aus der gleichen Erosionsstelle miteinander verglichen. Zwei solche Fundstellen konnten ausgewertet werden. Der Vergleich der Datierungen zeigt, dass die Veränderungen in den Faserzellen der Eschenwurzeln ein verlässliches Kriterium für die Freilegungsdatering darstellen. Bei der Eschenwurzel aus Abbildung 5 kann damit der Jahrring 1993 als erster Ring nach der Freilegung betrachtet werden.

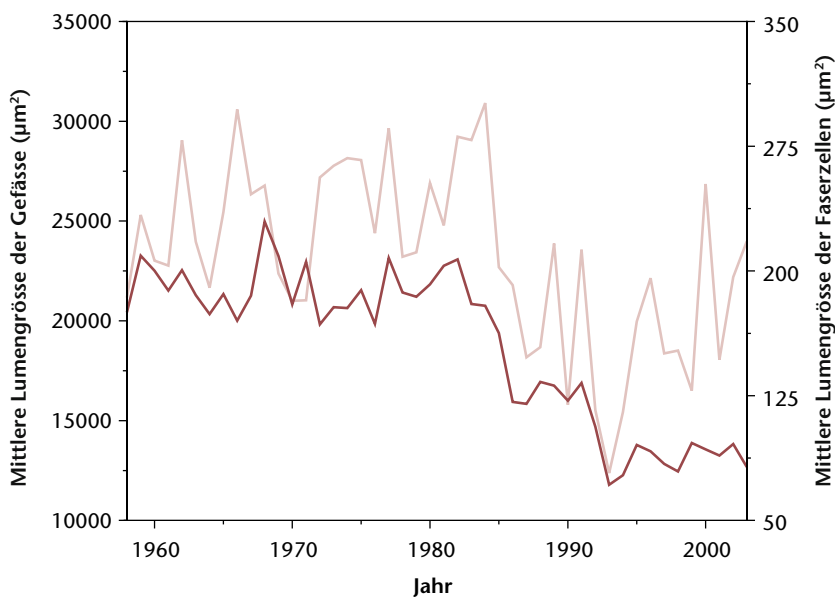


Abb 5 Mittlere Jahreswerte der Lumengrösse von Gefässen (hell) und der Faserzellen (dunkel) vermessen mit WinCELL. Sowohl Gefäss- als auch Faserzelllumina weisen im Jahr 1993 eine deutliche Reduktion der Zellgrössen um ca. 50% auf.

Die freigelegten Eschenwurzeln zeigen eine deutliche Reaktion in den Faserzellen, während die Gefässzellen unterschiedlich reagieren können. Neben der Freilegung, die einen starken Einfluss auf die anatomische Struktur der Wurzel hat (Fayle 1968, Gärtner et al 2001), beeinflussen auch andere Faktoren wie Klima und Alter die Anatomie der Wurzelzellen. Aus Untersuchungen über den Zusammenhang von anatomischen Strukturen im Stammholz und klimatischen Parametern geht hervor, dass vor allem die Gefässe stark auf das Niederschlagsregime reagieren (Baas 1973, Carlquist 1975, Baas et al 1983, February 1993, Woodcock & Ignas 1994, Sass & Eckstein 1995, Wiemann et al 1998, Gonzalez & Eckstein 2003, Eilmann et al 2006). Diese Studien beziehen sich zwar auf das Stammholz, sie scheinen

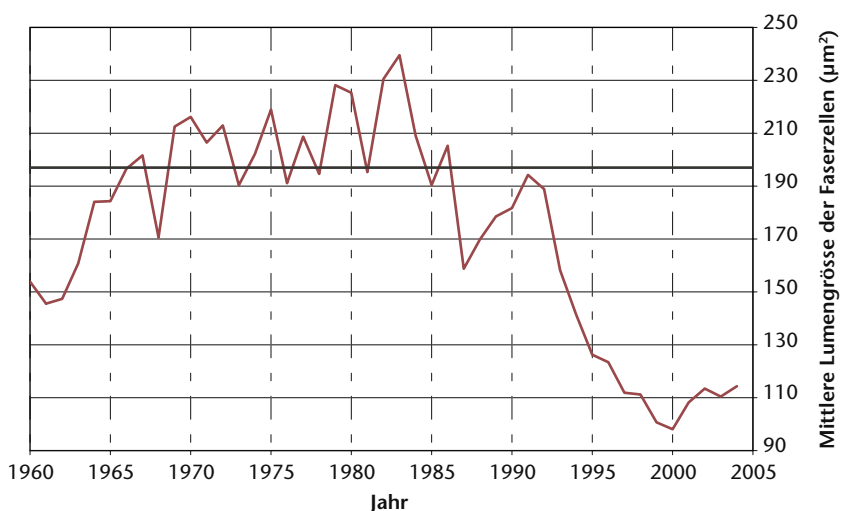


Abb 6 Mittlere Jahreswerte der Lumengrösse von Faserzellen einer freigelegten Eschenwurzel. Die Vermessung (WinCELL) zeigt eine deutliche Reduktion der Zellgrössen auf 60% nach 1997 im Vergleich mit dem langjährigen Mittelwert von 1960 bis 1986 (schwarze horizontale Linie).

aber teilweise auch auf das Wurzelholz übertragbar zu sein. Während die Reaktion der Gefässe auf die Freilegung uneinheitlich (Hitz et al 2007) und nicht andauernd ist (Abbildung 5), zeigen die Faserzellen nach der Freilegung eine andauernde Reduktion ihrer Zellgrössen.

Die Wurzelanalysen ermöglichen die Datierung des Freilegungszeitpunktes; es handelt sich dabei um ein Ereignisdatum. Aus der Anatomie der Wurzel, vor allem aus der Ausprägung der Freilegungsreaktion, lassen sich weitere Informationen über die Freilegungsumstände eruieren. Deutliche Reaktionen von Eschen- (Abbildung 5) beziehungsweise Fichtenwurzeln (Abbildung 3) lassen auf eine plötzliche Freilegung aufgrund eines intensiven Erosionsereignisses schliessen. Im Gegensatz dazu ist bei der Eschenwurzel aus Abbildung 6 anzunehmen, dass im Jahr 1993 nur der oberste Teil der Wurzel freigelegt wurde und die vollständige Freilegung nachher allmählich bis ins Jahr 1997 erfolgte. Dies würde jedenfalls die schwache Reaktion und die kontinuierliche Reduktion der Faserzelllumina erklären.

Neben der Beurteilung der Intensität des Freilegungsereignisses erlaubt die Analyse der Zellgrößenverteilung innerhalb des Frühholzes (bei Fichte) oder innerhalb des gesamten Jahrringes (bei Esche) zudem die saisonale Eingliederung der Freilegung. Bei der Fichte aus Abbildung 3 bleiben die Zellgrößen nach 1990 reduziert, was die Freilegung kennzeichnet. Es kann daraus gefolgert werden, dass der Jahrring 1991 vollständig nach der Freilegung gebildet worden ist. Eine Reduktion der Zelllumina, wie sie im Jahr 1978 auftritt und die sich auf ein oder wenige Jahre beschränkt, gründet in sehr schmalen Jahrringen von wenigen, kleinen Zellreihen, die in Folge auch kleine Zelllumen aufweisen. Harzkanäle, wie sie im Spätholz des Jahres 1989 ersichtlich sind, deuten auf eine Stresssituation hin (Bannan 1936) und lassen auf ein nicht genau datierbares Ereignis vor der Freilegung schliessen (Schweingruber 2001), welches die Fichtenwurzel mechanisch belastet hat. Vermutlich wirkte bereits 1989 ein Prozess im Bachlauf auf die Wurzel ein, ohne sie allerdings freizulegen. Der untersuchte Abschnitt der Wurzel ist mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Nachbrechen der Uferböschung oder durch weniger starke Erosionsprozesse endgültig freigelegt worden. Alle diese Informationen helfen, die genaue Position der Oberfläche vor der Freilegung zu eruieren und geben Hinweise zu den Freilegungsprozessen. In Kombination mit geomorphologischen Aufzeichnungen kann so die lokale Erosionsrate seit 1990 bestimmt werden.

Im Allgemeinen können Erosionsraten aus der Messung der aktuellen Bodenoberfläche gegenüber einer datierbaren Referenz (hier: Oberkante des ersten freigelegten Jahrringes der Wurzel = ehemalige Bodenoberfläche zum Zeitpunkt der Freilegung) in

Baumwurzeln hergeleitet werden (Gärtner 2007b). Der grosse Vorteil dieser Methode gegenüber herkömmlichen Messmethoden liegt im relativ leicht fassbaren Datenreichtum der Jahrringserie. Jedoch stellte sich als eines der häufigsten Probleme heraus, dass insbesondere die Laubholzwurzeln oft extrem schmale Jahrringe aufweisen, welche schwierig zu messen sind.

Langsame, kontinuierliche Erosionsprozesse zeichnen sich meist nicht durch eine deutliche Reaktion in den freigelegten Wurzeln aus. Solche Prozesse sind heute noch nicht ausreichend quantifizierbar. Es sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Vielfalt der anatomischen Veränderungen in Laubholzwurzeln zu erfassen und so das holzanatomische Potenzial der Laubholzwurzeln für dendrogeomorphologische Analysen nutzbar zu machen.

Schlussfolgerung

Die Resultate zeigen, dass es möglich ist, anatomische Veränderungen in Eschenwurzeln als Reaktion auf eine Wurzelfreilegung zu bestimmen. Diese Veränderungen können zur exakten Datierung des Freilegungsjahres verwendet werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung lassen eine Ausweitung solcher Analysen auf andere Laubholzarten als sinnvoll erscheinen. Damit könnten Erosionsprozesse künftig auch in Gebieten rekonstruiert werden, welche von Laubholzarten dominiert werden. Dank ihrer komplexeren Struktur enthalten Laubholzwurzeln mehr Informationen als Nadelholzwurzeln. Dadurch können auch mehr Details über die Art der Wurzelfreilegung und über die verschiedenen Erosionsprozesse (kontinuierliche und plötzliche Erosion) rekonstruiert werden.

Die Resultate dieser Studie bestätigen die Nützlichkeit und Wichtigkeit dendrogeomorphologischer Untersuchungen. Diese vermögen Ufererosion und Rutschungen in jahrgenauer Auflösung zu datieren und machen es so möglich, Ereignischroniken in Gegenden zu erstellen, in welchen Dokumentationen rar oder lückenhaft sind. ■

	Fichten	Eschen
Anzahl entnommene Proben (Wurzelscheiben)	183	54
Anzahl analysierte Proben (Wurzelscheiben)	99	25
Anzahl untersuchte Bäume	59	12
Anzahl untersuchte Wurzeln	61	18
Anzahl datierte Proben (Wurzelscheiben)	72	23
davon mit Freilegungsreaktion datiert	69	19
davon aufgrund einer Wunde datiert	3	4
Anteil der datierten Proben an der Gesamtmenge der analysierten Proben	72%	92%

Tab 1 Analytierte und datierte Proben.

Dank

Die Autoren danken dem Bundesamt für Umwelt (Bafu) für die Finanzierung des Projektes, sowie Christian Rickli, Hansueli Bucher, Tobias Meyer und Raphael Holland für ihre Unterstützung im Feld.

Literatur

- ALESTALO J (1971) Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105: 1–139.
- BAAS P (1973) The wood anatomical range in *Ilex* (Aquifoliaceae) and its ecological and phylogenetic significance. *Blumea* 21: 193–258.
- BAAS P, WERKER E, FAHN A (1983) Some ecological trends in vessel characters. *IAWA Bull* 4 (2–3): 141–159.
- BANNAN MW (1936) Vertical resin ducts in the secondary wood of the Abietineae. *New Phytol* 35: 372–384.
- BODOQUE JM ET AL (2005) Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: two examples from central Spain. *Catena* 64: 81–102.
- BUWAL (1998) Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Bern: Bundesamt Umwelt Wald Landschaft, Umwelt-Materialien 85. 248 p.
- CARLQUIST S (1975) Ecological strategies of xylem evolution. Berkeley: Univ California Press. 259 p.
- CARRARA E, CARROLL TR (1979) The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. *Earth Surf Process Landf* 4: 307–317.
- DANZER SR (1996) Rates of slope erosion determined from exposed roots of ponderosa pine at Rose Canyon Lake, Arizona. In: Dean J, Meko DM, Swetnam TW, editors. Proc «Tree rings, environment, and humanity», Tucson, Arizona, 17–21 May 1994. Tuscon: Univ Arizona, Departement Geosciences. pp. 671–678.
- DUNNE T, DIETRICH WE, BRUNENGO MJ (1978) Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya. *Z Geomorphol NF Suppl* 29: 130–140.
- EILMANN B, WEBER P, RIGLING A, ECKSTEIN D (2006) Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. *Dendrochronologia* 23 (3): 121–132.
- FAYLE DCF (1968) Radial growth in tree roots – distribution, timing, anatomy. Toronto: Faculty of Forestry, Univ Toronto, Technical Report 9. 183 p.
- FEBRUARY E (1993) Sensitivity of xylem vessel size and frequency to rainfall and temperature: implications for palaeontology. *Palaeontologia Africana* 30: 91–95.
- GÄRTNER H, SCHWEINGRUBER FH, DIKAU R (2001) Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia* 19: 81–91.
- GÄRTNER H (2002) The applicability of roots in dendrogeomorphology. In: Schleser G et al, editors. Proc «TRACE – Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology 1», Jülich, Germany, 11–13 Apr 2002. Jülich: Forschungszentrum Jülich, Schriften Umwelt 33. pp. 120–124.
- GÄRTNER H (2003) Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse. Berlin: Cramer. 118 p.

- GÄRTNER H, ESPER J, TREYDTE K (2004) Geomorphologie und Jahrringe – Feldmethoden in der Dendrogeomorphologie. Schweiz Z Forstwes 155: 198–207. doi:10.3188/szf.2004.0198
- GÄRTNER H (2007A) Glacial landforms, tree rings: dendrogeomorphology. In: Elias SA, editor. Encyclopedia of Quaternary Science. Amsterdam: Elsevier, vol 2. 979–988.
- GÄRTNER H (2007B) Tree roots – Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. Geomorphology 86 (3–4): 243–251.
- GONZALEZIG, ECKSTEIN D (2003) Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. Tree Physiol 23: 497–504.
- HITZ OM, GÄRTNER H, HEINRICH I, MONBARON M (2007) Reconstruction of erosive processes in mountain torrents by exposed tree roots. Dendrochronologia, in press.
- SOLOMON S ET AL, EDITORS (2007) Climate Change 2007. The physical science basis: contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge Univ Press. 996 p.
- LAMARCHE VC (1963) Origin and geologic significance of buttress roots of bristlecone pines, White Mountains, California. Washington DC: US Geol Survey, Prof Paper 475-C. pp. C148-C149.
- LAMARCHE VC (1968) Rates of slope degradation as determined from botanical evidence White Mountains California. Washington DC: US Geol Survey, Prof Paper 352-I. 376 p.
- MORNEAU C, PAYETTE S (1998) A dendroecological method to evaluate past caribou (*Rangifer tarandus* L.) activity. Ecoscience 5 (1): 64–76.
- PELFINI M, SANTILLI M (2006) Dendrogeomorphological analyses on exposed roots along two mountain hiking trails in the central Italian alps. Geogr Ann 88 A (3): 223–236.
- PLANAT (2004) Strategie Naturgefahren Schweiz. Synthesebericht. Biel: Bundesamt Wasser Geologie. 81 p.
- SASS U, ECKSTEIN D (1995) The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation. Trees 9: 247–252.
- SCHWEINGRUBER FH (1978) Mikroskopische Holzanatomie. Birnensdorf: Eidgenöss Forsch.anst Wald Schnee Landsch. 226 p.
- SCHWEINGRUBER FH (1996) Dendroecology: tree rings and environment. Bern: Haupt. 609 p.
- SCHWEINGRUBER FH (2001) Dendroökologische Holzanatomie. Bern: Haupt. 554 p.
- WIEMANN MC, WHEELER EA, MANCHESTER SR, PORTIER KM (1998) Dicotyledonous wood anatomical characters as predictors of climate. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol 139: 83–100.
- WOODCOCK DW, IGNAS CM (1994) Prevalence of wood characters in eastern North America: what characters are most promising for interpreting climates from fossil wood? Am J Bot 81: 1243–1251.

Erosionsrekonstruktion aufgrund anatomischer Veränderungen in Eschenwurzeln

Klimatische Veränderungen haben starke Auswirkungen auf fluviale Prozesse, so auch auf die Erosion in bewaldeten Wildbacheinzugsgebieten. Kontinuierliche und diskontinuierliche Erosion von bestockten Bachufern führt häufig dazu, dass die Bäume destabilisiert werden und umkippen. Die Datierung des Freilegungszeitpunktes von Wurzeln entlang der Bachufer in Kombination mit der dendrogeomorphologischen Analyse des Stammholzes ermöglicht die Rekonstruktion der Erosionsdynamik. In der vorliegenden Studie werden die holzanatomischen Merkmale freigelegter Eschenwurzeln (*Fraxinus excelsior* L.) analysiert. Es zeigt sich, dass Gefäss- und Faserzellen unterschiedlich reagieren: Faserzellen reagieren auf eine Freilegung deutlich mit einer Verkleinerung der Lumengrösse, die Gefässzellen weisen dahingegen eine grössere Variabilität auf. Die Ergebnisse belegen, dass es möglich ist, den Freilegungszeitpunkt von Eschenwurzeln jahrgenau zu bestimmen.

Reconstitution de l'érosion sur la base des modifications anatomiques des racines de frêne

Les changements climatiques ont de fortes répercussions sur les processus fluviaux, et en particulier sur l'érosion des bassins versants boisés des torrents. L'érosion continue ou intermittente des rives boisées des torrents a souvent pour conséquence de déstabiliser des arbres et de les renverser. La datation de la mise à nu des racines le long de la rive permet, en combinaison avec l'analyse dendrogeomorphologique du tronc, de reconstituer la dynamique de l'érosion. La présente étude analyse les caractéristiques anatomiques du bois des racines de frêne (*Fraxinus excelsior* L.) mises à nu. Il s'avère que les cellules des vaisseaux et des fibres réagissent de manière différente, les cellules des fibres par une nette réduction de la grandeur des lumens, les cellules des vaisseaux par une variété accrue. Les résultats démontrent qu'il est possible de déterminer à l'année près le moment de la mise à nu des racines.