

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse
Herausgeber: Schweizerischer Forstverein
Band: 159 (2008)
Heft: 3

Artikel: Rekonstruktion von Massenbewegungen mithilfe der Holzanatomie
Autor: Heinrich, Ingo / Gärtner, Holger
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097868>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Rekonstruktion von Massenbewegungen mithilfe der Holzanatomie

Ingo Heinrich

Labor für Dendrogeomorphologie, Universität Freiburg (CH)

Holger Gärtner

Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG), Forschungszentrum Jülich GmbH (DE)*

Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Dendro-Wissenschaften (CH)

Reconstruction of geomorphic events by means of wood anatomy

Geomorphic events such as debris flows and avalanches are likely to increase in magnitude and frequency due to the influence of global warming. Such processes usually have an impact on the growth of affected trees. As a consequence, dendroecological techniques have been developed to determine the frequency of these events. It is, however, rarely possible to retrieve information on the type and intensity of the geomorphic event. A comprehensive wood anatomical analysis of reaction wood has the potential to obtain more complete information on this matter. This paper presents the wood anatomical analysis of four European tree species. In growth experiments the impacts of the most common geomorphic events were realistically imitated. It was shown that in all four tree species the treated trees exhibited significant growth reactions compared to the untreated reference trees. The treatments are significantly different only in some cases but trends in the data can be identified. The stronger the bending was the more severe reaction wood was formed. Additional treatments to the apex of the trees resulted in a weakening of the reaction wood formation. The results showed that the accuracy of dendrogeomorphic reconstructions profits from further wood anatomical investigations, which should be applied if an intraseasonal reconstruction is aimed for.

Keywords: Wood anatomy, reaction wood, geomorphic processes, growth experiments

doi: 10.3188/szf.2007.0058

* Wilhelm-Johnen-Strasse, D-52425 Jülich, E-Mail i.heinrich@fz-juelich.de

Die Häufigkeit und Stärke von geomorphologischen Prozessen, wie beispielsweise Murgängen und Lawinen, werden im Zuge der globalen Klimaerwärmung wahrscheinlich zunehmen. Solche Prozesse haben einen Einfluss auf das Baumwachstum. In der Dendrogeomorphologie wurden in den letzten Jahren verschiedene Techniken entwickelt, um die Häufigkeit solcher Prozesse zu rekonstruieren (Schweingruber 1996). Baumanalysen können somit helfen, die Schutzfunktion des Waldes über einen längeren Zeitraum hinweg zu beurteilen.

In den bisherigen Studien ist es jedoch kaum gelungen, aufgrund der Wachstumsreaktionen im Jahrringbild zusätzliche Informationen wie beispielsweise Prozessstyp oder -intensität abzuleiten. Dies ist nur mit einer exakten geomorphologischen Prozessbestimmung im Vorfeld der Beprobung möglich. Eine Unterscheidung der Prozessstypen ist besonders dann von Interesse, wenn verschiedene Prozesse am gleichen Ort auftreten, weil sonst die verschiedenen Ereignisse in einer Chronologie zusammengefasst und die Frequenzen nicht korrekt wiedergegeben werden (Clague & Souther 1982). Ein

weiterer kritischer Punkt bisheriger dendrogeomorphologischer Arbeiten ist die Feststellung der Prozessintensität. Yumoto et al (1983) schlagen deshalb aufgrund einer Studie mit verschiedenen Koniferen vor, die Intensität vergangener Massenbewegungen anhand der holzanatomischen Wachstumsreaktionen zu beurteilen.

Die vorliegende Arbeit stellt holzanatomische Untersuchungen des Reaktionsholzes bei vier europäischen Baumarten vor. Um die typischen Auswirkungen der häufigsten Massenbewegungen möglichst realistisch nachzuahmen, wurden in einem Wachstumsexperiment verschiedene mechanische Belastungen auf zwei Nadelholzarten (*Larix decidua* Mill. und *Picea abies* (L.) Karst.) und zwei Laubholzarten (*Fagus sylvatica* L. und *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) ausgeübt. Die Autoren stellen die Hypothese auf, dass es möglich ist, verschiedene Intensitätsklassen im Reaktionsholz von Nadel- und Laubbäumen zu identifizieren. Zusätzlich werden einige Hinweise zu neuen Methoden für die zukünftige Anwendung qualitativer Merkmale wie beispielsweise traumatischer Harzkanalreihen oder Verschüttungsreaktionen gegeben.

Im Gelände

An den vier Standorten wurden jeweils neun verschiedene Wachstumsexperimente an je vier Bäumen durchgeführt und zudem je eine Referenzgruppe ausgewählt (Tabelle 1). Dabei wurden die Experimente teilweise von früheren Studien inspiriert (Robards 1966; Wardrop 1956, 1964).

Die Bäume der Gruppen T1 bis T3 wurden unterschiedlich stark gebogen. In den Gruppen T4, T5 und T8 wurde zusätzlich der Apex, d.h. der obere Teil des Haupttriebes, vertikal belassen (T4) beziehungsweise abgetrennt (T5) oder zur Seite gebogen (T8). Diese unterschiedlichen Formen des Umbiegens treten bei Massenbewegungen häufig auf. Bei den Bäumen der Gruppen T6 und T7 wurden zusätzlich die Borke und das Kambium partiell an der Ober beziehungsweise an der Unterseite entfernt, wodurch die gleichzeitige Schrägstellung und Verletzung der Bäume simuliert wurde. In Gruppe T9 wurden die Bäume ebenfalls stark in die Horizontale gebogen, zusätzlich wurde das Wurzelsystem beschädigt. In einem weiteren Experiment, in der sogenannten Rockfall-Gruppe (nicht in Tabelle 1 aufgelistet), wurden die Baumstämme zur Imitation von Steinschlag mit einem 5-kg-Vorschlaghammer stark verletzt. In der Gruppe T10 schliesslich wurden zusätzlich fünf Erlenstämme (*Alnus glutinosa*) bis zu einer Höhe von ca. 40 cm mit Erde bedeckt. Diese Behandlung simulierte eine teilweise Verschüttung, die oft bei Murgängen vorkommt.

Die Experimente wurden im März 2004 durchgeführt. Im Oktober 2004 wurden die Versuche mit anderen Bäumen in gleichem Umfang wiederholt. Das Ziel dieser Vorgehensweise war, mögliche Unterschiede der Auswirkungen von Lawinen (Auf-treten meist vor Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr) und von Murgängen (Auf-treten meist während der Vegetationsperiode im Sommer/Spätsommer) festzustellen. Die Entnahme der Proben (Stamm-scheiben) erfolgte jeweils am Ende der auf die Versuche folgenden Vegetationsperiode.

Im Labor

Die entnommenen Baumscheiben wurden zunächst geschliffen, dann wurden die für die holzanatomische Auswertung wichtigen Bereiche mit Reaktionsholz festgelegt. Von diesen Bereichen wurden anschliessend mit einem Schlittenmikrotom Dünnschnitte (15 µm) angefertigt. Diese wurden mit Astrablau und Safranin eingefärbt und in Kanadabalsam fixiert (Schweingruber 2001). Die Mikroskopierarbeiten wurden mit einem Zeiss-Axioskop durchgeführt. Mit einer angeschlossenen Digitalkamera wurden Fotos angefertigt. Mit der Analysesoftware WinCELL Pro 2005a wurden die Lumenflächen der Tracheiden (TLF), Gefässe (GLF)

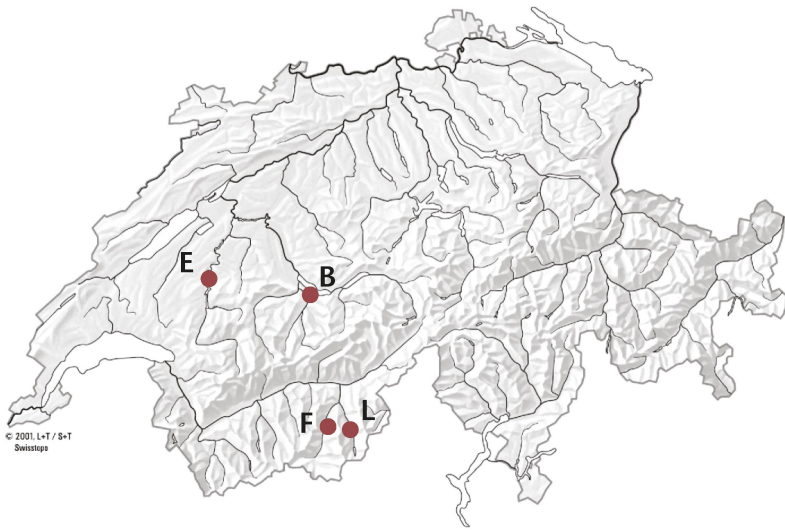


Abb 1 Lage der Untersuchungsstandorte. L: Lärchen; F: Fichten; B: Buchen; E: Erlen.

Untersuchungsgebiete

Entsprechend den zu untersuchenden Nadel- und Laubbaumarten wurden vier verschiedene Untersuchungsgebiete ausgewählt, in welchen jeweils eine der Baumarten dominiert und wo die Bäume unter natürlichen Bedingungen und ungestört aufwachsen (Abbildung 1). Für die Untersuchung der Nadelbaumarten wurden zwei Gebiete in den Schweizer Alpen gewählt. Der Lärchenstandort befindet sich oberhalb der Gemeinde Saas Balen (Saas-tal, Wallis) zwischen 1500 und 1550 m ü.M., der Fichtenstandort bei St. Niklaus (Mattertal, Wallis) zwischen 1220 und 1250 m ü.M. Die Untersuchungen an den Laubbaumarten wurden in den Schweizer Voralpen durchgeführt, wo Buchen und Erlen weiter verbreitet sind. Der Buchenstandort befindet sich bei Krattigen (Bernere Oberland) zwischen 800 und 840 m ü. M., der Erlenstandort bei Posieux (Fribourg) auf 600 m ü.M. Alle Standorte beinhalten sowohl Hanglagen als auch ebene Bereiche. Die Baumbestände weisen jeweils eine heterogene Altersstruktur auf (15 bis 140 Jahre).

T1	Stamm um 80° nach unten gebogen
T2	Stamm um 45° nach unten gebogen
T3	Stamm zunehmend stark nach unten gebogen
T4	Stamm um 80° nach unten gebogen, aber Apex bleibt vertikal
T5	Stamm um 80° nach unten gebogen und Apex abgetrennt
T6	Stamm um 80° nach unten gebogen und Borke und Kambium an der oberen Seite teilweise entfernt
T7	Stamm um 80° nach unten gebogen und Borke und Kambium an der unteren Seite teilweise entfernt
T8	Stamm um 80° nach unten gebogen und Apex zur Seite gebogen
T9	Stamm um 80° nach unten gebogen und Wurzelsystem teilweise zerstört
T10	Stamm verschüttet (nur bei <i>Alnus glutinosa</i>)
R	Referenzgruppe

Tab 1 Liste der Gruppen mit den unterschiedlichen Behandlungen T1 bis T10 und einer Referenzgruppe R.

Abb 2 Der Vergleich von Dünnschnitten zeigt die unterschiedlich intensive Druckholzausprägung in einem Baum der Gruppe T1 (links) und T2 (Mitte) im Vergleich zum Referenzbaum (rechts) bei *Larix decidua* (mag.: 40×). Beginn des Experiments: im Oktober 2004 (T).

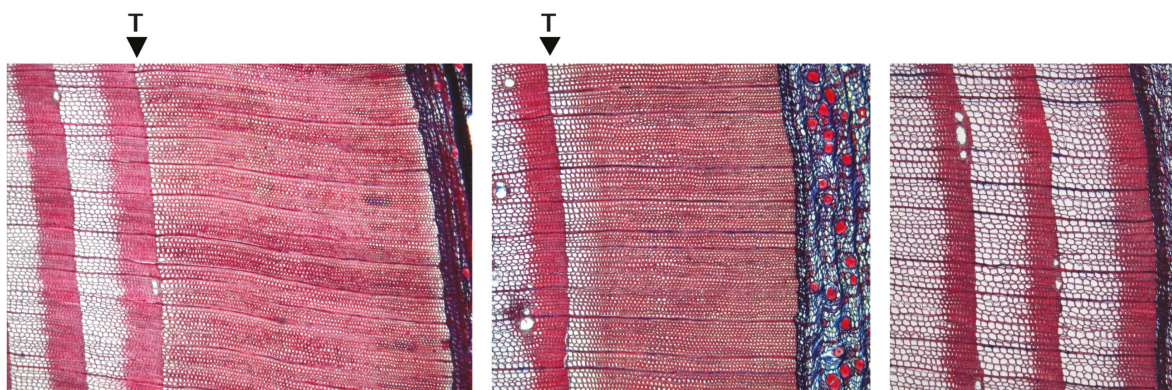
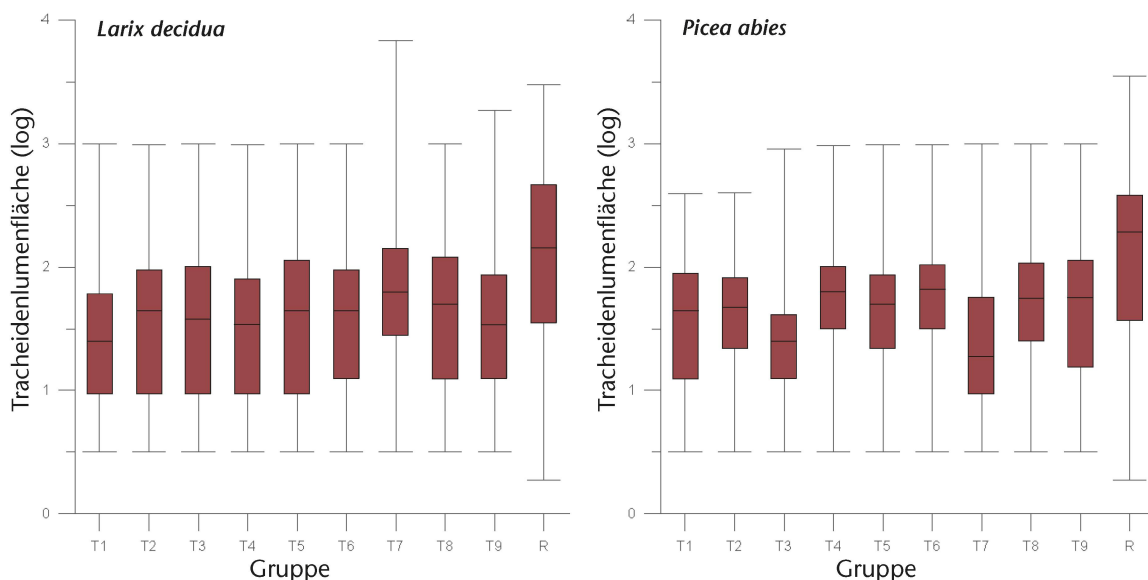


Abb 3 Box-Whisker-Plots der Tracheidenlumenflächen auf der Druckholzseite von *Larix decidua* (links) und *Picea abies* (rechts). T1 bis T9: Behandlungsarten laut Tabelle 1; die Daten wurden vor der Analyse log-transformiert, um eine Normalverteilung zu gewährleisten.



und Faserzellen (FLF) halbautomatisch erfasst. Dabei wurde die automatische Objekterkennung und -messung vom Anwender überwacht und, wenn nötig, verbessert.

Alle resultierenden Daten wurden anschließend in S-PLUS 6.0 Professional Release 1 statistisch analysiert. Mit den S-PLUS-Diagnoseplots wurden die Verteilung der Datenpunkte und die Varianz überprüft und mögliche Ausreisser identifiziert. Wegen der Schiefe der Verteilung wurden die Daten zudem log-transformiert, um eine Normalverteilung zu gewährleisten. Für die weitere grafische Auswertung der Daten wurden Box-Whisker-Plots angefertigt, welche einen einfachen Vergleich der Mittelwerte respektive Mediane und der Streuung ermöglichen. Bei Normalverteilung unterscheiden sich zwei Datensätze signifikant voneinander, wenn die Box eines Datensatzes den Median der anderen Box nicht überschneidet (Cleveland 1994).

Resultate und Diskussion

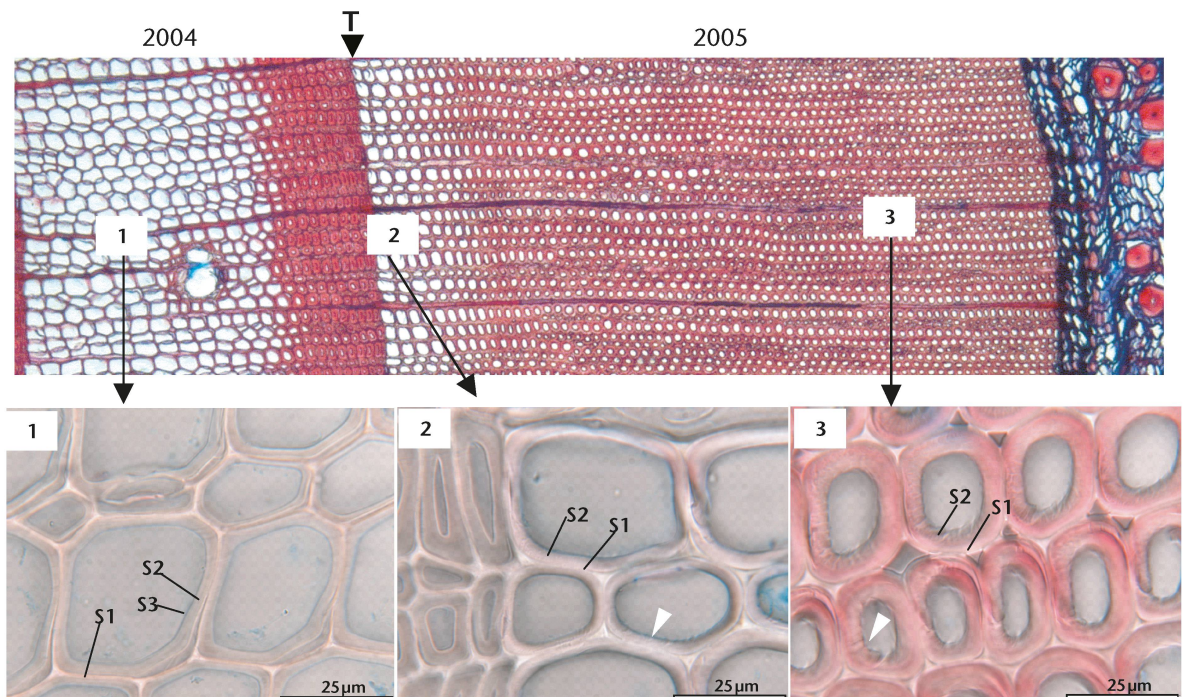
Nadelbäume

Der visuelle Vergleich der Dünnschnitte ergab, dass die Experimente generell wirkungsvoll waren: Die Bäume reagierten innerhalb kürzester Zeit

auf den mechanischen Reiz und erzeugten Druckholz. Abbildung 2 zeigt die Bildung von Druckholz bei einer Lärche. Die Proben im linken (T1) und im mittleren (T2) Foto weisen Druckholz auf, wobei im linken Bild das Druckholz stärker ausgeprägt ist. Das heisst, dass ein breiterer Jahrring mit mehr Druckholz angelegt worden ist. Das rechte Foto zeigt die normale Struktur des entsprechenden Jahrringes in einem Referenzbaum. Der Unterschied zwischen T1 (Stamm um 80° nach unten gebogen) und T2 (45°) ist wahrscheinlich auf das intensivere Biegen und somit den stärkeren mechanischen Reiz in der Gruppe T1 im Vergleich zur Gruppe T2 zurückzuführen. Demnach ist es möglich, anhand der Druckholzausprägung einen Unterschied im mechanischen Reiz auszumachen.

Abbildung 3 zeigt die Box-Whisker-Plots der Tracheidenlumenflächen (TLF) auf der Druckholzseite der untersuchten Lärchen und Fichten. Obwohl die TLF in den wenigsten Fällen signifikant variieren, sind einige Trends bemerkbar, zum Beispiel nimmt die TLF bei beiden Arten von Gruppe T1 nach T2 zu. Diese Zunahme widerspiegelt den visuellen Eindruck aus Abbildung 2 und lässt vermuten, dass die Biegestärke und die Druckholzintensität positiv miteinander korrelieren. Ausserdem ist die TLF in den Gruppen T4 bis T6 beider Arten tendenziell

Abb 4 Beispiel einer Druckholzreaktion im Jahr 2005 als Folge einer Schrägstellung im Oktober 2004 (T) in *Larix decidua*. Die ersten Zellreihen 2005 (2 oben) haben leicht verdickte Zellwände. Die Detailvergrößerung zeigt in den Frühholzzellen (2 unten) das Fehlen der S3-Schicht (vgl. 1 unten) und eine deutlich verdickte Zellwand (S2) mit erkennbaren spiralförmigen Vertiefungen (weisse Pfeile), wie sie für Druckholz (3) typisch sind.



grösser als in T1. Die Druckholzintensität scheint also durch die zusätzlichen Behandlungen (Apex vertikal, Apex abgetrennt oder Borke und Kambium teilweise entfernt) abgeschwächt worden zu sein.

Bei der qualitativen Untersuchung der holz-anatomischen Merkmale im Druckholzbereich zeigten viele Proben zu Beginn des untersuchten Jahres eine bis mehrere Reihen von Zellen, die wie normale Frühholzzellen aussehen. Makroskopisch erscheint dieser Bereich heller als das übrige Druckholzgewebe (Abbildung 2, linkes und mittleres Foto). Dadurch entsteht der Eindruck, dass die mechanische Beeinflussung ungefähr im Mai des betreffenden Jahres stattgefunden hat. In unserem Versuch wurden die Bäume aber bereits im Oktober des Vorjahres behandelt. Erst eine mikroskopische Untersuchung der Dünnschnitte bei hoher Vergrößerung (1000 \times) zeigt, dass die S3-Schicht der Zellwand in diesem Bereich nicht vorhanden ist und es

sich deshalb bei den normal erscheinenden Zellen bereits um Druckholzzellen handelt (Abbildung 4). Ausserdem ist die S2-Schicht der Zellwand in diesen ersten Zellen leicht verdickt und zeigt die typischen spiralförmigen Vertiefungen normal ausgeprägter Druckholzzellen (Timell 1986). Bei diesen ersten Zellreihen handelt es sich also um grosslumige, dünnwandige und nicht gerundete Druckholzzellen, die ohne zusätzliche mikroskopische Untersuchungen irrtümlich als normale Frühholzzellen eingeordnet würden, was eine Falschdatierung des Ereignisses (in unserem Fall um rund sechs Monaten) zur Folge hätte.

Ein weiteres Problem ist die bisherige Verwendung von traumatischen Harzkanalreihen (TH) zur genauen oder sogar intraannuellen Datierung (Stoffel et al 2006). Unsere Ergebnisse für die Gruppen T6 und T7, in denen das Kambium zur Imitation von Schäden durch Lawinen oder Steinschlag verletzt wurde, demonstrieren, dass eine genaue Datierung aufgrund der TH problematisch ist. Wie die Abbildungen 5 und 6 zeigen, führten die Wunden zu mehreren TH (weisse Pfeile), wobei das Auftreten innerhalb des Jahres sehr variabel war. Während in einigen Proben die TH völlig fehlten, wurden sie in den anderen oft erst im Übergangsbereich vom Früh- zum Spätholz gefunden. Dies könnte dahingehend interpretiert werden, dass die mechanische Beeinflussung im Sommer des laufenden Jahres geschah. Die Bäume wurden aber schon im vorherigen Oktober verletzt. Die auffälligste Beobachtung jedoch ist, dass die Positionen der einzelnen TH entlang dem Baumumfang variieren. Je nach Distanz zum Wundgewebe befinden sich die Harzkanäle an unterschiedlichen Positionen: In der Nähe der

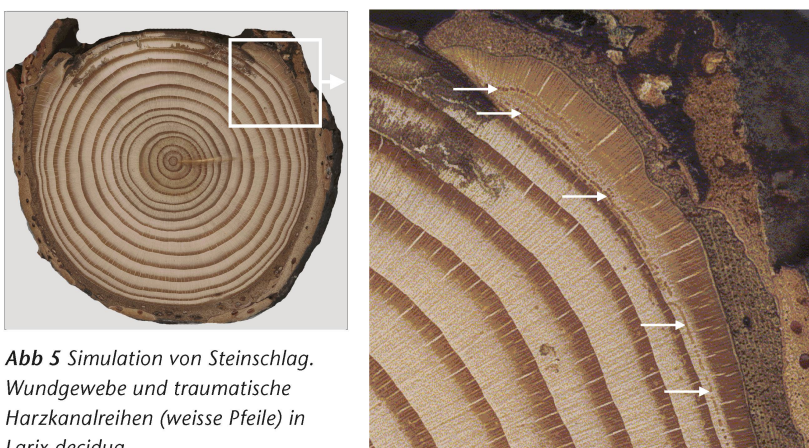
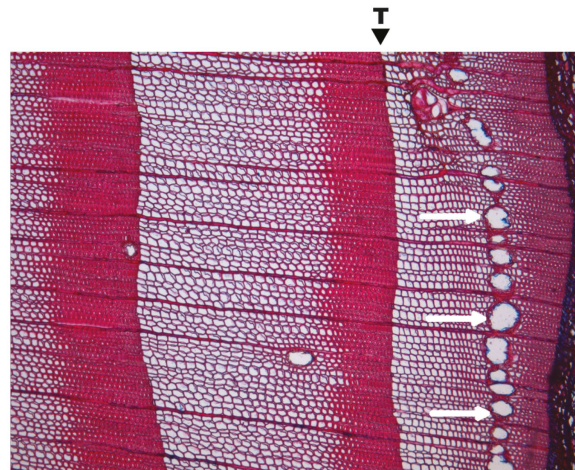


Abb 5 Simulation von Steinschlag. Wundgewebe und traumatische Harzkanalreihen (weisse Pfeile) in *Larix decidua*.

Abb 6 Links: Durch eine Lawine nach unten gebogene Lärche. Rechts: Wundgewebe und traumatische Harzkanalreihen (weisse Pfeile) in *Larix decidua*. Verwundung des Baumes im Oktober 2004 (T), Auftreten der traumatischen Harzkanalreihe jedoch in der Mitte des Jahrringes 2005 (mag.: 50×).



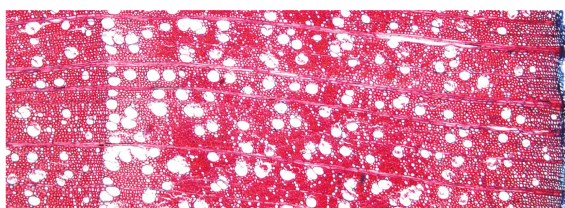
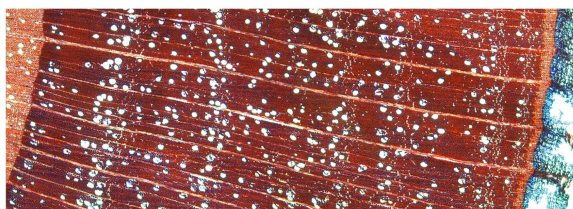
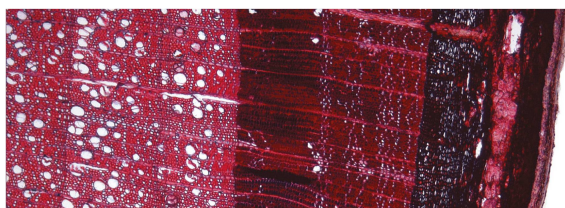
Wunde sind die Harzkanäle in die ersten Frühholzzellen eingebettet, in grösserer Entfernung von der Wunde befinden sich die TH an der Grenze zwischen Früh- und Spätholz und in wenigen Fällen sogar im beginnenden Spätholz.

Angesichts dieser Erkenntnisse hängen die Ergebnisse bisheriger Untersuchungen, in welchen ausschliesslich mit 5-mm-Zuwachsbohrproben gearbeitet wurde (z.B. Stoffel et al 2006), entscheidend von der relativen Position der Bohrkernprobe zur Verletzung ab. Während in manchen Fällen die Bohrkernprobe keine TH aufweisen, können die TH in anderen Proben von Anfang bis Mitte des Jahrringes liegen, wodurch eine verlässliche intraannuelle Datierung unmöglich ist. Dieses Problem wird weiter verschärft, wenn lange Reihen mit Bohrkernproben erstellt werden; denn frühere, weit zurückliegende Verletzungen sind meist völlig überwallt und von aussen nicht mehr sichtbar. In diesen Fällen kann die relative Lage der Probe zur alten Verwundung nicht festgestellt und somit die relative Lage der TH innerhalb

des Jahrringes nur schwer abgeschätzt werden. Die Resultate demonstrieren, dass das Merkmal traumatische Harzkanalreihen für intraannuelle Rekonstruktionen mit Bohrproben nicht zuverlässig ist und dass selbst bei interannueller Betrachtung durch fehlende oder auskeilende TH die resultierenden Zeitreihen verfälscht werden können.

Demzufolge ist eine zuverlässige Datierung von Verletzungen, wie sie durch Steinschlag oder andere Prozesse verursacht werden, nur durch die Analyse des ersten Auftretens von Kallusgewebe im Randbereich der Wunde gewährleistet. Zukünftige Arbeiten in den Bereichen Steinschlag- und Lawinenrekonstruktion sollten deshalb möglichst auf Stammscheiben zurückgreifen. Traumatische Harzkanalreihen können nur als Anzeichen einer früheren Störung gewertet, nicht aber für eine Datierung des auslösenden Prozesses verwendet werden. Um die verlässliche Datierung zu gewährleisten, sind andere Reaktionsmerkmale, wie beispielsweise Druckholz, beizuziehen.

Abb 7 Der Vergleich der Dünnschnitte zeigt Unterschiede bei der Dichte der Faserzellen und der Anzahl und Grösse der Gefässzellen bei *Fagus sylvatica*. Von oben nach unten: Gruppe T1, Gruppe T2 und Referenzgruppe (mag.: 40×).



Laubbäume

Der Vergleich der drei Fotos in Abbildung 7 zeigt bei der Buche in den Gruppen T1 (Foto oben) und T2 (mittleres Foto) im Vergleich zur Referenzgruppe (Foto unten) Unterschiede sowohl bei den Faserzellen (Fasertracheiden und Librifasern) als auch bei den Gefässen. Beide Gruppen haben mehr oder weniger stark ausgeprägtes Zugholz gebildet. In der Gruppe T1 haben die Faserzellen besonders dicke Zellwände und kleine Lumina und besitzen nur sehr wenige Gefässzellen mit kleinem Lumen. In der Gruppe T2 hingegen zeigen die Faserzellen eine geringere Dichte, und der Anteil der Gefässzellen ist grösser.

Die Box-Whisker-Plots (Abbildung 8) bestätigen den visuellen Eindruck. Das Zelllumen der Gefässe (GLF) variiert zwischen den einzelnen Behandlungsgruppen teilweise deutlich. Beispielsweise unterscheiden sich die GLF der Gruppen T1 und T3 in *Alnus glutinosa* signifikant, was darauf hinweist, dass Zugholzintensität und Schwere der mechani-

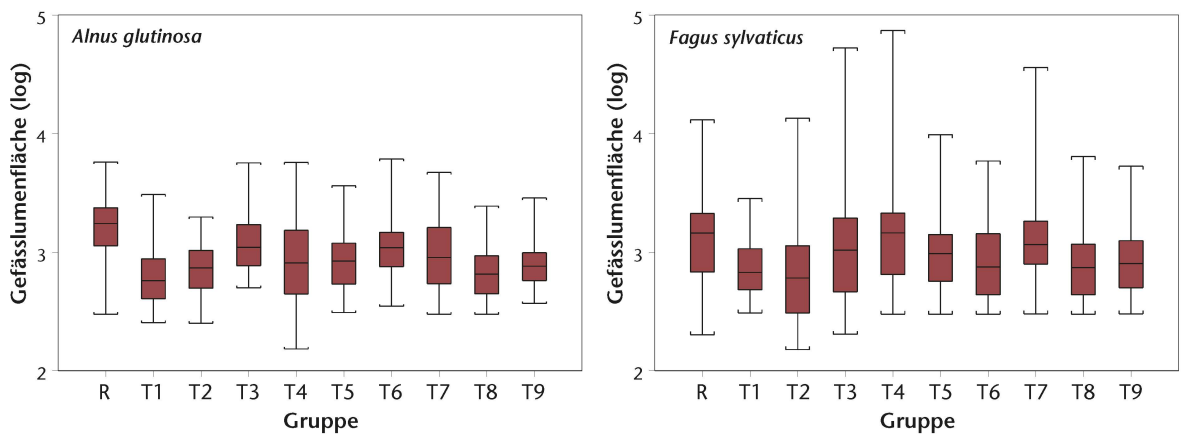


Abb 8 Box-Whisker-Plots der Lumenflächen der Gefässe auf der Zugholzseite von *Alnus glutinosa* (links) und *Fagus sylvatica* (rechts). T1 bis T9: Behandlungsarten gemäss Tabelle 1. Die Daten wurden vor der Analyse log-transformiert, um eine Normalverteilung zu gewährleisten.

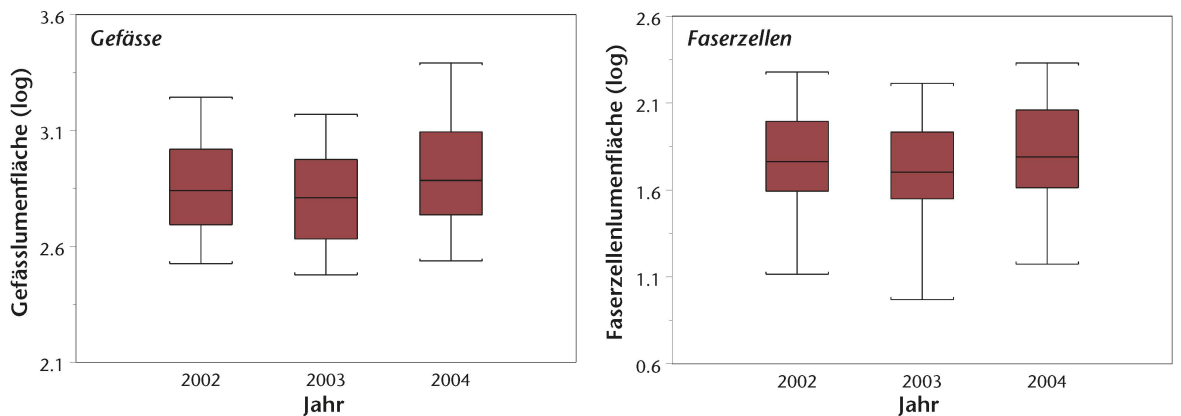


Abb 9 Box-Whisker-Plots der Lumenflächen der Gefässe (links) und Faserzellen (rechts) aus dem verschütteten Stammbereich von fünf Erlen für die Jahre 2002 bis 2004; die Daten wurden vor der Analyse log-transformiert, um die nötige Normalverteilung zu gewährleisten.

schen Belastung positiv korrelieren. Im Gegensatz zu den Nadelhölzern (Abbildung 3) ist die Streuung innerhalb der einzelnen Behandlungsgruppen weniger gross, und die Unterschiede zwischen den Gruppen sind deutlicher. Dies deutet darauf hin, dass sich Laubbäume für genaue Rekonstruktionen geomorphologischer Prozesse besser eignen als Nadelbäume, die aufgrund der zumeist schwachen Variation der Tracheidlumenflächen nur begrenzt auf die verschiedenen mechanischen Einflüsse reagieren können.

Weiter zeigen die Box-Whisker-Plots in Abbildung 8, dass die über die mechanischen Verbiegungen hinausgehenden Behandlungen wie beispielsweise das partielle Entfernen des Kambiums in den Gruppen T6 und T7 eine zusätzliche Veränderung des Zugholzes zur Folge hatten. In der Gruppe T4 wurde der Apex wieder zurück in die Vertikale gedrückt und in der Gruppe T5 sogar abgetrennt. Die zusätzlichen Behandlungen führten zu weniger intensivem Zugholz als in der Gruppe T1. Dieses Ergebnis stützt die allgemeine These, dass der Apex das Gravitationszentrum eines Baumes ist (Sitte et al 2002). Vergleichbar mit den Ergebnissen für Nadel-

bäume (Yumoto et al 1983), scheint es demnach auch bei Laubbäumen möglich zu sein, anhand der variablen Lumenflächen der Gefässe und Faserzellen das Zugholz in verschiedene Intensitätsklassen einzuteilen. Dies ermöglicht es allenfalls, die Schwere und Art einzelner geomorphologischer Prozesse zu rekonstruieren.

In einem weiteren Experiment (Gruppe T10) wurden die Stämme von fünf Erlen für den Zeitraum eines Jahres mit Bodenmaterial verschüttet, danach wieder freigelegt und holzanatomisch untersucht. In den verschütteten Stammbereichen zeigten die Bäume eine leichte holzanatomische Reaktion. Die Lumenflächen der Gefässe und Faserzellen nahmen in der Vegetationsperiode 2004, dem Jahr der Verschüttung, im Vergleich zu 2003 und 2002 tendenziell zu (Abbildung 9). Die Unterschiede waren aber nicht signifikant.

Im Gegensatz dazu konnten Cournoyer & Bégin (1992) bei *Fraxinus pennsylvanica* zeigen, dass Eschen, deren Stämme unter 3.2 m Sediment des St.-Lawrence-Stromes begraben wurden, auf diese Verschüttung sofort mit holzanatomischen Veränderungen reagierten. Die Struktur des Eschenholzes

änderte sich von ringporig zu diffusporig. Die Autoren der vorliegenden Arbeit gehen davon aus, dass der vergleichsweise geringe Verschüttungsgrad von nur 40 cm während eines Jahres der Grund dafür war, dass die Reaktionen nicht stärker ausfielen. Sie vermuten, dass eine Verstärkung und Verlängerung der Stammverschüttung zu eindeutigeren Ergebnissen geführt hätte.

Ähnliche Verschüttungen sind bereits mithilfe der Datierung von Adventivwurzeln bei Koniferen rekonstruiert worden (Bayard & Schweingruber 1991, Strunk 1997). Jedoch besitzen nicht alle Baumarten die Fähigkeit, Adventivwurzeln zu bilden, sodass eine holzanatomische Analyse der Zellveränderungen im Stamm als Folge der Verschüttung neue Rekonstruktionsmöglichkeiten eröffnet. Demgegenüber führen Wurzelfreilegungen durch Erosion zur umgekehrten Reaktion, nämlich der Abnahme der Zelllumenflächen (Gärtner et al 2001, Hitz et al 2008 in diesem Heft).

Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie demonstriert, dass in Zukunft bei dendrogeomorphologischen Untersuchungen die beiden Methoden der Jahrringanalyse und der Holzanatomie kombiniert werden sollten, um zuverlässige und detaillierte Rekonstruktionen der verschiedenen Prozesse zu erreichen. Das Einbeziehen holzanatomischer Methoden ermöglicht ein sicheres intraannuelles Datieren und liefert zusätzliche qualitative Informationen über den mechanischen Einfluss. Obwohl sich die Rekonstruktion von geomorphologischen Prozessen bisher hauptsächlich auf Nadelbäume gestützt hat, sprechen die vorliegenden Ergebnisse für eine vermehrte Nutzung der Laubbäume.

Laubbäume liefern in der vorliegenden Untersuchung mehr Informationen in Bezug auf die zeitliche Auflösung und die Stärke des Prozesses. Die Holzstruktur der Laubbäume scheint empfindlicher auf Störungen zu reagieren, was an den ausgeprägteren Unterschieden der Zelllumenflächen zwischen den Behandlungsgruppen zu erkennen ist. Zudem ist die Holzanatomie komplexer und bietet mit den Gefäss- und Parenchymzellen mehr Zellstrukturen für weitere Analysen. Besonders die Gefässgrößen reagieren sensibel auf ökologische und mechanische Reize. Die Lumenflächenvergrößerungen der Gefässe infolge Stammverschüttungen bieten sich als eine neue Möglichkeit zur Datierung von Sedimentationsprozessen an. Im Gegensatz dazu formen Nadelbäume oft verzögertes Reaktionsholz, bei dem der Anfang des Jahrringes aus scheinbar normalen Frühholzzellen besteht, die nur nach eingehenden mikroskopischen Untersuchungen als Druckholzzellen identifiziert werden können.

Solche mikroskopischen Analysen erfordern aber spezielles Wissen und eine Ausrüstung, die in der Dendrogeomorphologie oft nicht vorhanden sind. Für dendrogeomorphologische Rekonstruktionen bedeutet dies, dass eine Datierung von Massenbewegungen, die nur über auftretende Exzentrizitäten und die makroskopische Analyse des Auftretens von Druckholzzellen durchgeführt wird, unter Umständen ungenau sein kann und durch holzanatomische Arbeiten abgesichert werden sollte. Das spezielle Druckholz im Frühholz der untersuchten Nadelhölzer ist unseres Wissens in der Literatur noch nicht erwähnt worden und sollte in weiteren Untersuchungen näher beleuchtet werden. Dafür würden sich weitere Feldversuche und andere Analysemethoden wie beispielsweise die Rasterelektronenmikroskopie anbieten.

Die Resultate besitzen auch Relevanz für benachbarte Disziplinen wie die Dendroklimatologie, wo vermehrt die Gefässgrößen benutzt werden, um Klimaparameter zu rekonstruieren (Sass & Eckstein 1995, Fonti & García-González 2004). Die vorliegende Arbeit zeigt jedoch, dass die Gefässgrößen nicht nur klimasensitiv sind, sondern auch auf mechanische Belastungen reagieren. Dies kann zu einer Verfälschung solcher Klimarekonstruktionen führen. Erhöht wird das Fehlerrisiko noch dadurch, dass Zugholz makroskopisch nicht einfach zu erkennen ist und so bei der normalen Jahrringanalyse leicht übersehen werden kann. ■

Dank

Die Autoren bedanken sich bei den Förstern Urs Andenmatten, Leo Jörger, Beat Zurbuchen und Jacques Galley für ihre Hilfe bei der Standortwahl und Probenentnahme. Britta Eilmann, Jacqueline Bolli, Clarissa Zurwerra (WSL, Birmensdorf), Stefan Winter (Universität Freiburg i.Ue.), Raphael Holland (Geografie, Universität Bonn) und Sebastian Späth (Forstwissenschaften, Universität Freiburg i.Br.) waren uns eine grosse Hilfe während der Probenentnahme und -präparation. Das Projekt «Holzanatomie und Geomorphologie» wurde durch den Schweizerischen Nationalfonds unterstützt (No. 200021-101668/1).

Literatur

- BAYARD M, SCHWEINGRUBER FH (1991) Ein Baumgrenzstandort: Das Wildwasserbett der Maggia im Tessin, Schweiz. Eine dendroökologische Studie. *Bot Helv* 101: 9–28.
- CLAGUE JJ, SOUTHER JG (1982) The dusty creek landslide on Mount Cayley, British Columbia. *Can J Earth Sci* 19: 524–539.
- CLEVELAND WS (1994) The elements of graphing data. Summit: Hobart Press. 297 p.

- COURNOYER L, BÉGIN Y (1992) Effets de l'érosion riveraine sur les structures anatomiques de *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. dans le haut estuaire du Saint-Laurent, Québec, Canada. *Dendrochronologia* 10: 107–120.
- FONTI P, GARCÍA-GONZÁLEZ I (2004) Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. *New Phytol* 163: 77–86.
- GÄRTNER H, SCHWEINGRUBER FH, DIKAU R (2001) Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia* 19: 1–11.
- HITZ OM, GÄRTNER H, HEINRICH I, MONBARON M (2008) Erosionsrekonstruktion aufgrund anatomischer Veränderungen in Eschenwurzeln. *Schweiz Z Forstwes* 159:51–57. doi: 10.3188/szf.2008.0051.
- ROBARDS AW (1966) The application of the modified sine rule to tension wood production and eccentric growth in the stem of crack willow (*Salix fragilis* L.). *Ann Bot* 30: 513–523.
- 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 (1996) Tree rings and environment. *Dendroecology*. Bern: Haupt. 609 p.
- SCHWEINGRUBER FH (2001) Dendroökologische Holzanatomie. Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Bern: Haupt. 472 p.
- SITTE P, WEILER EW, KADEREIT JW, BRESINSKY A, KÖRNER C (2002) Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Heidelberg: Spektrum. 1123 p.
- STOFFEL M, BOLLSCHWEILER M, HASSLER GR (2006) Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach. *Earth Surf Process Landf* 31: 1424–1437.
- STRUNK H (1997) Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena* 31: 137–51.
- TIMELL TE (1986) Compression wood in gymnosperms. Berlin: Springer. 2150 p.
- WARDROP AB (1956) The nature of reaction wood. *Aust J Bot* 4: 152–166.
- WARDROP AB (1964) Reaction anatomy of arborescent angiosperms. In: Zimmermann MH, editor. Formation of wood in forest trees. New York: Academic Press. pp. 405–456.
- YUMOTO M, ISHIDA S, FUKAZAWA K (1983) Studies on the formation and structure of the compression wood cells induced by artificial inclination in young trees of *Picea glauca*. IV. Gradation of the severity of compression wood tracheids. Hokkaido: Univ Hokkaido, Research Bulletins of the College Experiment Forests 40: 409–454.

Rekonstruktion von Massenbewegungen mithilfe der Holzanatomie

Die Häufigkeit und Stärke geomorphologischer Prozesse, wie beispielsweise von Murgängen und Lawinen, werden im Zuge der globalen Klimaerwärmung wahrscheinlich zunehmen. Solche Prozesse haben einen Einfluss auf das Baumwachstum. In den letzten Jahren sind neue dendroökologische Techniken entwickelt worden, um diese Prozesse zu rekonstruieren. In den bisherigen Studien ist es jedoch kaum gelungen, auch den Prozesstyp oder die Prozessintensität zu bestimmen. Mehr Informationen dazu können holzanatomische Untersuchungen des Reaktionsholzes liefern. Der Beitrag stellt holzanatomische Untersuchungen bei vier europäischen Baumarten vor. Im Rahmen eines Wachstumsexperimentes wurden die typischen Auswirkungen der häufigsten Massenbewegungen möglichst realistisch nachgeahmt. Bei allen vier Baumarten zeigten die behandelten Bäume im Vergleich zu den Referenzbäumen signifikante Wachstumsreaktionen. Die einzelnen Behandlungen unterscheiden sich nur in wenigen Fällen signifikant voneinander. Tendenziell wurde aber umso mehr Reaktionsholz gebildet, je stärker die Bäume gebogen wurden. Zusätzliche mechanische Behandlungen hatten hingegen eher eine Schwächung der Reaktionsholzbildung zur Folge. Die Resultate zeigen, dass die Genauigkeit dendrogeomorphologischer Rekonstruktionen durch holzanatomische Analysen verbessert werden kann und dass holzanatomische Analysen insbesondere dann durchgeführt werden sollten, wenn intraannuelle Rekonstruktionen angestrebt werden.

Reconstitution des déplacements de masse à partir de l'anatomie du bois

La fréquence et l'intensité des processus géomorphologiques tels que les laves torrentielles et les avalanches vont probablement augmenter à la suite du réchauffement climatique. Ces processus influent sur la croissance des arbres. De nouvelles technologies dendro-écologiques permettant de reconstituer ces phénomènes ont été développées ces dernières années. Les études réalisées jusqu'à présent ne sont toutefois guère parvenues à déterminer le type ou l'intensité des processus. Les examens de l'anatomie du bois de réaction peuvent nous fournir davantage d'informations à ce sujet. Le présent article décrit des examens de l'anatomie du bois de quatre essences européennes. Les effets typiques des déplacements de masse les plus fréquents ont été simulés de manière aussi réaliste que possible dans le cadre d'un essai de croissance. On a observé chez les quatre essences des réactions de croissance significatives par rapport aux arbres de référence. Les différents traitements ne se distinguent que rarement les uns des autres. La quantité de bois de réaction formé a cependant tendance à augmenter en fonction de la pression exercée sur l'arbre. En revanche, des actions mécaniques supplémentaires entraînent plutôt une diminution de la formation de bois de réaction. Les résultats montrent que la précision des reconstitutions dendrogeomorphologiques peut être améliorée et que les analyses de l'anatomie du bois sont surtout indiquées lorsque l'on cherche à réaliser des reconstitutions intra-annuelles.