

Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in  
Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer  
Prozesse

**Dissertation**

zur

Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)

der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt von

Holger Gärtner

aus

Heidelberg

Bonn, September 2001

Anfertigung mit Genehmigung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

1. Referent: Prof. Dr. R. Dikau
2. Referent: Prof. Dr. F.H. Schweingruber

Tag der Promotion: 22.10.2001

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit basiert auf einer Anregung von Prof. Dr. Fritz H. Schweingruber (Institut für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Schweiz), der mir mit diesem Thema den Weg in eine neue, spannende Richtung der Dendrogeomorphologie aufzeigte. Ihm gilt mein aufrichtiger Dank für seine Bereitschaft, mir auch über große Distanzen hinweg beratend zur Seite zu stehen, sein großes Interesse an der Arbeit selbst und seine stetige Bereitschaft, über anstehende Probleme zu diskutieren.

Besonderer Dank gebührt Prof. Dr. Richard Dikau, der bereits während des Studiums und im Rahmen der Diplomarbeit meine Begeisterung für die Geomorphologie förderte und der mir die Möglichkeit bot, wertvolle Erfahrungen im Bereich von Lehre und Forschung zu machen. Seiner großen Unterstützung während der letzten Jahre habe ich viel zu verdanken.

Großer Dank gilt auch Prof. Dr. Michel Monbaron und Dipl.-Geogr. Markus Stoffel (Universität Fribourg, Schweiz) für die Gelegenheit, am Geographischen Institut der Universität Fribourg ein dendrogeomorphologisches Labor aufzubauen und zu leiten.

Ebenso bin ich Prof. Dr. K.-H. Schmidt (Universität Halle) zu Dank verpflichtet, der mir die Probenahme in Thüringen ermöglichte und mich ins Gelände einführte. Diesbezüglich gilt mein Dank auch Dipl.-Geogr. Ingo Beyer und Ingo Sahling für die Unterstützung bei der Standortauswahl und auch der Probenahme selbst. An dieser Stelle gilt mein Dank auch Dr. D.C.F. Fayle (Toronto) für die unterstützenden Worte und die Zusendung seiner umfangreichen Arbeit über das Wachstum von Baumwurzeln. Ausdrücklich Bedanken möchte ich mich bei Dr. Jan Esper. Der intensive Austausch und die vielen Diskussionen auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit waren immer sehr anregend.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe von Prof. Dikau, die mir jederzeit bei größeren oder kleineren Problemen zur Seite standen. Besonders erwähnen möchte ich dabei Jochen Schmidt, der mit seiner Hilfsbereitschaft und Diskussionsfreudigkeit immer eine große Stütze war.

Jan Esper, Kerstin Treydte, Burkhard Neuwirth, Isabelle Roer, Dirk Strauch, Jochen Schmidt, Markus Stoffel und Thomas Glade möchte ich besonders für die Durchsicht von Teilen des Manuskriptes danken. Hierbei gebührt mein besonderer Dank Jan Esper und Kerstin Treydte, deren kritikfreudige Diskussionsbereitschaft mir immer eine große Hilfe war.

Großer Dank gilt Isabelle Roer für ihre Geduld und Unterstützung vor allem, aber nicht nur, in der Endphase der Arbeit. Weiterhin möchte ich mich bei allen bedanken, die hier nicht namentlich genannt wurden, die mich aber in den letzten Jahren bei vielen Gelegenheiten unterstützt haben. Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, auf deren Verständnis und Unterstützung ich mich immer verlassen konnte.

<b>VORWORT</b>	<b>I</b>
<b>VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN</b>	<b>III</b>
<b>VERZEICHNIS DER TABELLEN</b>	<b>VIII</b>
<b>1. EINFÜHRUNG</b>	<b>1</b>
1.1. Stand der Forschung und spezielle Problematik	2
1.2. Hypothesen, Konzeption und Fragestellung	6
1.3. Arbeitsstrategie	8
<b>2. WURZELWACHSTUM UND FREILEGUNGSREAKTIONEN</b>	<b>11</b>
2.1. Wurzelfunktionen	11
2.2. Wurzelwachstum	12
2.3. Wurzelausbreitung im Untergrund	14
2.3.1. Gravitropismus	15
2.3.2. Chemotropismus	18
2.4. Reaktionen auf veränderte Umweltbedingungen	18
2.4.1. Strukturelle Variationen	20
2.4.1.1. Bodendruck	20
2.4.1.2. Luftzirkulation	20
2.4.1.3. Mechanischer Stress	21
2.4.1.4. Licht	22
2.4.1.5. Temperatur	24
<b>3. DATEN</b>	<b>26</b>
3.1. Untersuchungsgebiete und Material	26
<b>4. METHODEN</b>	<b>33</b>
4.1. Prozeßbestimmung	33
4.2. Dokumentation und Probennahme	35
4.3. Codierung und Präparation der Proben	36
4.3.1. Präparation der Dünnschnitte	38
4.4. Auswertung	41
4.4.1. Graustufenanalyse	43
4.4.2. Zellgrößenmessung	43
4.4.3. Zellanzahl	44
4.4.4. Saugversuche	44
<b>5. ERGEBNISSE</b>	<b>45</b>
5.1. Strukturen nicht freigelegter Wurzeln	45
5.2. Strukturen freigelegter Wurzeln	59
5.3. Diagnostische Merkmale	85
5.4. Einflußfaktoren	89
5.5. Strukturveränderung und Funktionswechsel	91
5.6. Möglichkeiten der Anwendung	95
5.6.1. Rekonstruktion von Abtragsraten	95
5.6.2. Anwendungsbeispiele zur Rekonstruktion von Spaltenöffnungen	97
5.7. Zusammenfassung	101
<b>6. DISKUSSION</b>	<b>106</b>
<b>7. EVALUATION &amp; AUSBLICK</b>	<b>110</b>
<b>8. LITERATUR</b>	<b>112</b>
<b>ANHANG</b>	

- Abb. 1: Fließdiagramm der grundlegenden Arbeitsschritte der Untersuchung.
- Abb. 2: Blockdarstellung des sekundären Xylems (Stamm) von *Pinus strobus* unter Angabe der Hauptschnittrichtungen für die Präparation. Die Ausprägung der Zellen im Querschnitt ist grundlegend vergleichbar mit dem Zellaufbau der Wurzel. (Quelle: RAVEN et al. 1988:531)
- Abb. 3: **A)** Schematische Darstellung der frühen Entwicklungsstadien einer Wurzelspitze. **B)** Vergleich der Primär- und Sekundärstruktur von Wurzel und Sproßachse am Beispiel einer dikotylen Gehölzpflanze. a) Nach Ende des primären Wachstums, b) Kambiumentstehung, c) Bildung von sekundärem Xylem und Phloem, d) Nach einjährigem Wachstum (Quelle: A: RAVEN et al. 1988: 471, B: RAVEN et al. 1988: 520).
- Abb. 4: Wachstum und tropistische Krümmung bei fadenförmigen Einzelzellen. (nach: LIBBERT, 1987)
- Abb. 5: Senfkeimling in Wasserkultur. Sprossachse positiv phototrop, Wurzel negativ phototrop. Blattspreite transversal-phototrop (nach: SITTE et al., 1998)
- Abb. 6: Reaktion der Statolithen (☉) auf die Schwerkraft: a) senkrecht nach unten wachsende Wurzel; b) Drehung der Wurzel um 90°; c) die Amyloplasten gleiten infolge der Schwerkrafteinwirkung zu den ehemals vertikalen Zellwänden (Quelle: RAVEN et al. 1998: 564 (verändert)).
- Abb. 7: Darstellung des exotropen Wachstums einer Wurzel (Aufsicht). Die Wurzelspitze behält nach dem Umwachsen eines Hindernisses ihre ursprüngliche Wuchsrichtung bei.
- Abb. 8: Darstellung der Zuwachssteigerungen der Jahrringbreite unter verschiedenen Lichteinflüssen nach einem Jahr der Freilegung. Der Steigerungswert bezieht sich auf das Verhältnis der gemessenen Jahrringbreite nach der Freilegung zu dem erwarteten Wert bei nicht Freilegung. Die erwarteten Werte beziehen sich auf den Durchschnitt der zuvor gebildeten Jahrringe im unveränderten Medium. (Quelle: FAYLE 1968:38).
- Abb. 9: Temperaturverlauf im Boden. A: Sommertemperaturisochronen im unbedeckten Boden. B: Jahresgang der Temperatur in verschiedenen Bodentiefen (nördliches Europa). Quelle: LARCHER 1987: 55)
- Abb. 10: Vegetationskarte der Schweiz und Lage der Untersuchungsgebiete. Die Vegetationsgliederung erfolgt durch Zusammenfassung der Pflanzenarten mit gleicher horizontaler und vertikaler Verbreitung zu Vegetationsgürteln (nach Schmid 1998).
- Abb. 11: Ausschnitt der topographischen Landeskarte der Schweiz 1:100 000, Valais, Wallis (105) zur Darstellung der Untersuchungsgebiete. Die eingefügten Zahlen markieren die jeweiligen Standorte der Probenahme im Mattertal (1,3,4,6,8,9) und Turtmanntal (5,7,10). (Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (BA-013691)).
- Abb. 12: Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen der Jahre 1951 – 1980, Ausschnitt Turtmanntal und Mattertal. Quelle: Hydrologischer Atlas der Schweiz.
- Abb.13: Darstellung der austreichenden Wellenkalk-Schichtstufen im Thüringer Becken sowie die Lage der Untersuchungsgebiete. **11:** Arnstadt; **12:** Eschwege; **13:** Bleicherode (Quelle: Johnsen & Schmidt 2000: 97, nach Weber 1955).
- Abb. 14: Handskizze (Aufsicht) einer vermessenen Wurzelprobe sowie die Markierung der Position der zu entnehmenden Scheiben.
- Abb. 15: Abtrennung des markierten Bereiches aus der Wurzelscheibe
- Abb. 16: Darstellung verschiedener Dünnschnittergebnisse. **A:** Spur einer „Scharte“ des Messers (Pfeil) im Dünnschnitt. **B:** Zerdrückte und ausgerissene Zellwände (Pfeil) durch einen ungünstigen Anstellwinkel des Messers. **C:** Gelungener Schnitt bei optimaler Einstellung.

- Abb. 17: Ablauf der Datenerhebung, Probennahme und Präparation zur Analyse freigelegter Wurzeln. 1: Geländeerhebung. 2: Probennahme und Auswahl der Querschnitte. 3: Präparation gegenüberliegender Querschnitte. 4: Makroskopische Auswertung (u.a. Jahrringbreite, Alter). 5: Ausspalten markierter Blöcke. 6: Anfertigen der Dünnschnitte. 7: Auswertung der Merkmale unter dem Mikroskop und Präsentation durch Photographien. (Verändert nach GÄRTNER et al. 2001:3)
- Abb. 18: Jahrringe einer *Larix decidua* Wurzel (**A**) (Probe in 17cm Tiefe entnommen) im Vergleich zu Jahrringen eines *Larix decidua* Stammes (**B**). Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Photos. Die Markierungen in Bild **A** kennzeichnen auskeilende Jahrringe (weiße Pfeile), sowie Verbiegungen der Markstrahlen (rote Pfeile) und traumatische Harzkanalreihen (schwarzer Pfeil), die auf mechanische Beanspruchungen schließen lassen.
- Abb. 19: Dünnschnittaufnahme einer *Larix decidua* Wurzel, Entnahmetiefe 14cm. Auffallend sind die vor allem im Außenbereich deutlicher ausgeprägten Spätholzzellen. Richtung Zentrum ist diese Ausprägung weniger deutlich (weiße Pfeile).
- Abb. 20: Dünnschnitt *Picea abies* Wurzel, Probentiefe 9cm. **A**: Zusammengesetzte Photos zur Darstellung der Jahrringausprägung. Vor allem im äußeren Bereich ist das Spätholz, der Übergang Frühholz – Spätholz wie auch die Jahrringgrenze deutlich ausgeprägt. Die Pfeile weisen auf Zuwachssteigerungen durch mechanische Belastung hin (siehe Text). **B**: Vergrößerter Ausschnitt der inneren Jahrringe. Die Jahrringgrenzen werden durch undeutlich ausgebildete Spätholzzellen gebildet. **C**: Vergrößerter Ausschnitt der äußeren Jahrringe. Das Spätholz ist deutlich ausgeprägt, die Anzahl der Frühholzzellen deutlich höher als im inneren Bereich.
- Abb 21: *Larix decidua* Wurzel, Entnahmetiefe 5cm. Dargestellt ist ein Vergleich der inneren (**A**) und äußeren (**B**) Jahrringe. Die unterschiedliche Ausprägung der Spätholzzellen (schwarze Pfeile in **A** und **B**) spiegelt unterschiedliches Wachstum in verschiedenen Tiefen wider. Erkennbar sind druckholzähnliche Strukturen in **B** (weißer Pfeil), rundliche, nicht abgeflachte Zellen mit stark ausgebildeten Zellwänden.
- Abb. 22: Jahrringausprägungen dreier in unterschiedlicher Tiefe entnommener *Pinus cembra* Wurzeln. Die Probe aus 17cm Tiefe zeigt undeutliche Jahrringgrenzen durch eine minimale Ausprägung der Spätholzzellen. In 10cm Tiefe ist eine regelmäßige Anordnung der Spätholzzellen und eine steigende Anzahl der Frühholzzellen erkennbar. Die Probe aus 5cm Tiefe zeigt eine etwas deutlichere Ausprägung der Spätholzzellen, die Zellanzahl bleibt jedoch begrenzt.
- Abb. 23: Zusammenfassende Darstellung der durchschnittlichen Ausprägung der Jahrringstrukturen in unterschiedlichen Bodentiefen am Beispiel einiger *Larix decidua* Wurzeln.
- Abb. 24: Ausschnitte einer in 10cm Tiefe entnommenen, nicht freigelegten 120-jährigen *Larix decidua* Wurzel (HCW0102f). Ausschnitt **A** zeigt den Bereich der inneren Jahrringe nahe dem Zentrum, Ausschnitt **B** die Struktur der äußeren Jahrringe, die keine Unterschiede zu **A** aufzeigen.
- Abb 25: Diagramm der Jahrringbreite (JRB) gegen die entsprechende Frühholz- (FHB) und Spätholzbreite (SHB) der Wurzelprobe HCW0102f. Die einheitliche Reduktion der Breite zwischen 1957 und 1960 wird durch das Auftreten traumatischer Harzkanäle 1960 begrenzt (vergleiche Abb. E9 + 10).
- Abb 26: Diagramm der durchschnittlichen Zelllänge und –breite pro Jahr gemittelt aus je 20 gemessenen Zellen. Auffallend ist das gleichbleibende Niveau der Zellbreite, während die Zelllänge einen absteigenden Trend aufweist. Zwischen 1957 und 1960 unterschreiten die Längen- die Breitenwerte deutlich, am deutlichsten 1960 durch das Auftreten der traumatischen Harzkanalreihe. Ab diesem Jahr wird das vorherige Längenniveau nicht mehr erreicht.

- Abb. 27: Darstellung der Flächenwerte der Frühholzzellen (Zellgröße). In dieser Darstellung wird der ab 1957/1960 einsetzende Niveauunterschied der Zellgröße deutlich, der maßgeblich durch einen Rückgang der Zelllängen gesteuert wird (vergleiche Abbildung 26).
- Abb. 28: Frostring im Frühholz einer *Larix decidua* Wurzel. Die Wurzel wurde in 8cm Tiefe zwischen zwei Blöcken einer Murablagerung entnommen.
- Abb. 29: Dünnschnittaufnahme eines Frostringes im Frühholz einer *Larix decidua* Wurzel. Die Diagramme zeigen den Verlauf der Jahrringbreiten (oben) wie auch der Frühholzzellgrößen (unten). Zu beachten ist die Aufteilung des Jahres 1995 in den Bereich vor (a) und nach (b) der Frosteinwirkung zur genaueren Auswertung der Zellgrößenänderung.
- Abb. 30: Generalisierte Darstellung der Entnahmesituation der Wurzel HCB0101f an der Seite der Murrinne Birchbach, Mattertal, Schweiz.
- Abb. 31: Scanbilder der entnommenen Scheiben der *Larix decidua* Wurzel HCB0101f und der entsprechenden Position in der Gesamtprobe. Die blaue Markierung im dunkel dargestellten (freigelegten) Teil der Probe kennzeichnet die Grenze zwischen schneller und kontinuierlicher Freilegung gemäß der Geländeansprache. Die Oberseite der Scheiben entspricht jeweils der Orientierung der Wurzel in Richtung der Bodenoberfläche, vergleiche Abb. 30.
- Abb. 32: Vergleich der Struktur einer schnell freigelegten (links) mit der einer nicht freigelegten (rechts) Wurzelprobe von HCB0101f. Zu erkennen sind drei Zonen (A,B,C) mit typischen Strukturen unterschiedlicher Tiefenlage. Die freigelegte Probe zeigt in Abschnitt C allerdings eine deutliche Reduktion der Größe der Frühholzzellen. Deutlich ausgeprägt ist das Jahr der Störung (Harzkanäle in 1978) in beiden Proben.
- Abb. 33: Diagramm der Länge und Breite der Frühholzzellen der freigelegten Probe 2CB0101f. 1978 unterschreitet der Wert der Länge den der Breite der Zelle durch das Auftreten traumatischer Harzkanäle. Danach erfolgt eine weitere Reduktion beider Werte, wobei die Breite erneut unter die Werte der Länge absinkt. Beide Größen verbleiben in den Folgejahren auf niedrigerem Niveau gegenüber den Jahren vor der Störung.
- Abb. 34: Diagramm der Länge und Breite der Frühholzzellen der nicht freigelegten Probe 0CB0101f. 1978 (wie bei 2CB0101f, Abb. 33) unterschreitet der Wert der Länge den der Breite der Zelle durch das Auftreten traumatischer Harzkanäle. Im Folgejahr kehren beide Werte wieder auf das alte Niveau zurück.
- Abb. 35: Vergleichendes Diagramm der Größe der Frühholzzellen (Flächenwert, Länge \* Breite der Zellen) der freigelegten (2CB0101f) und der nicht freigelegten (0CB0101f) Probe. Zu erkennen ist die deutliche Größenreduktion in der freigelegten Probe nach der Störung 1978.
- Abb. 36: Diagramme der Graustufenanalysen (Graustufenwerte 0 = schwarz bis 255 = weiß) der freigelegten Probe 2CB0101f für die Jahrringe 1970 bis 1981. **A**): Diagramm der von der Bildgröße abhängigen Pixelanzahl der Graustufen 0 bis 255 der einzelnen Jahrringe. **B**): Diagramm der Bildgrößen und damit Jahrringbreiten unabhängigen gewichteten mittleren Graustufensummen getrennt nach Jahrring (JR, schwarz), Frühholzanteil (FH, rot) und Spätholzanteil (SH, blau).
- Abb. 37: Dünnschnittaufnahme der nicht freigelegten Probe 3CB0101f. Erkennbar sind die traumatischen Harzkanäle 1978 und die ab 1981 einsetzende Veränderung der Jahrringstruktur. 1985 sind deutlich druckholzähnliche Zellen ausgebildet (roter Pfeil). Das Rechteck im Scanbild der Scheibe markiert die Position des dargestellten Dünnschnittpräparates.

- Abb. 38: Dünnschnittaufnahme der langsam freigelegten Probe 1CB0101f. Erkennbar ist die gleichmäßig deutlicher werdende Ausprägung der Spätholzzellen ab 1984. Bis einschließlich 1987 gibt es keine Reduktion der Zellgrößen im Frühholz. Zwischen 1988 und 1990 (d) ist eine kontinuierliche Reduktion erkennbar. Ab 1991 ist die Zellgröße um mehr als 50% reduziert. a), b), c): Ausschnittvergrößerungen der Jahrringe 1973/74, 1985/86 und 1991. Das Rechteck im Scanbild der Scheibe markiert die Position des dargestellten Dünnschnittpräparates.
- Abb. 39: Dünnschnittaufnahme einer freigelegten *Picea abies* Wurzel (1CS0102h). Die beiden Ausschnittvergrößerungen zeigen die deutliche Reduktion der Größe der Frühholzzellen.
- Abb. 40: Diagramme der Messung der Frühholzzellgrößen von *Picea abies* 1CS0102h zeigen eine Reduktion der Zellgrößen ab 1977 um mehr als 50%. **A**): Darstellung der Länge und Breite der FH-Zellen. **B**): Darstellung der Reduktion der Zellgröße (Fläche).
- Abb. 41: Dünnschnittaufnahme der *Larix decidua* Wurzel 1CS0103g. Erkennbar ist eine Reduktion der Größe der Frühholzzellen im Jahrring 1977. Der optische Eindruck läßt auch eine gleichmäßige Reduktion zwischen 1975 und 1977 schließen.
- Abb. 42: Diagramme der Graustufenanalyse (**A**) wie auch der Zellgrößenmessung (**B**: Längen und Breitenwerte, **C**: Zellflächen). Die Größenmessungen zeigen eine kontinuierliche Reduktion 1975 bis 1977. Ebenso, wenn auch weniger deutlich, die jährliche Graustufenanalyse.
- Abb. 43: Dünnschnitt der *Pinus cembra* Probe (1CH0202f) und Diagramme der Jahrringbreitenvariationen (oben), der Zellgrößenveränderungen (unten) sowie einem Vergleich Jahrringbreiten und Zellgrößenveränderungen (mitte). Der rote Pfeil markiert kallusartige Zellen, die hier den Übergang zu einer Harztasche markieren.
- Abb. 44: Ausschnitt des Scanbildes der *Larix decidua* Wurzelscheibe 0CR0101f. Die Pfeile markieren die starke Ausprägung der Borke
- Abb. 45: Dünnschnittaufnahme der freigelegten *Larix decidua* Probe 0CR0101f. Die Diagramme der FH-Zellgrößenreduktion wie auch die Störung an der Jahrringgrenze 1955 / 1956 (Pfeil) lassen auf eine Freilegung vor Beginn der Vegetationsperiode 1956 schließen
- Abb. 46: Dünnschnittaufnahme der nicht freigelegten *Larix decidua* Probe 1CR0101f. Abstand zu 0CR0101f = 40cm, Lage: 2cm nach dem Übergang der Wurzel in das Substrat. Die Diagramme der Zellgrößen zeigen keinen Hinweis auf eine Beeinflussung durch die Freilegung.
- Abb. 47: Gegenüberstellung der Zellgrößenveränderungen im Frühholz der freigelegten (0CR0101f) und der nicht freigelegten (1CR0101f) *Larix decidua* Probe des Standortes Ritigrabe.
- Abb. 48: Dünnschnitt der *Larix decidua* Wurzel 0CL0101h. Die Diagramme zeigen die Entwicklung der FH-Zellgrößen (oben, mitte) wie auch einen Vergleich der Zellflächenveränderung mit dem Verlauf der Jahrringbreiten. Die Zellgrößen zeigen eine beginnende Freilegung 1971-1976, erneute Überschüttung und anschließende kontinuierliche Freilegung 1983-1989.
- Abb. 49: Diagramm der Jahrringbreitenentwicklung einer durch kontinuierliche Abtragsprozesse 1977 freigelegten *Larix decidua* Wurzel unter Angabe der radialen Anzahl der Zellreihen im Frühholz (FH-Zellanzahl) und Spätholz (SH-Zellanzahl). **a**: Letzter Jahrring mit undeutlich ausgebildeten Spätholzzellen und der Dominanz der Frühholzzellen bei der Jahrringbreite (vergleiche Abbildung 41). **b**: Traumatische Harzkanäle führen zu einer Reduktion der Jahrringbreite bei gleichbleibender Zellanzahl. **c**: Zeitpunkt der Freilegung durch die Auswertung der Frühholzzellgröße.

- Abb. 50: Dünnschnittaufnahme einer *Pinus sylvestris* Wurzel. Deutlich zu erkennen ist der schnelle Übergang der Jahrringstruktur als Reaktion einer schnellen Annäherung an die Oberfläche mit nachfolgender Freilegung (Zellgrößenreduktion, schwarzer Pfeil). Die Jahrringe vor der Annäherung sind deutlich unregelmäßiger ausgebildet, auskeilende Jahrringe (rote Pfeile) sind häufig zu finden.
- Abb. 51: Ergebnisse einiger Saugversuche mit den Färbemitteln Cobalt-Blau und Safranin (rot). **a)** *Larix decidua* 14cm Tiefe, **b)** *Larix decidua* 10cm Tiefe, **c) + e)** *Picea abies* freigelegt, **d)** *Larix decidua* freigelegt.
- Abb. 52: Realistische Bestimmung von Bodenabtragsraten unter Einbeziehung des Freilegungszeitpunktes und des darauf folgenden Wurzelwachstums. **A)** Überschätzung der Abtragsmenge durch nicht berücksichtigtes Wurzelwachstum seit der Freilegung. **B)** Realistische Bestimmung der Abtragsmenge durch Rekonstruktion der Wurzelgröße und damit der Position der Wurzeloberkante/Bodenoberfläche zum Zeitpunkt der Freilegung.
- Abb. 53: Datierung verschiedener Proben einer Eschenwurzel zur Bestimmung des Maximalalters der Spalte an der Stelle der Probenahme. Der Gesteinsverband der rechten Bildhälfte stellt die sich bewegende Mauerscholle dar.
- Abb. 54: Entnahmesituation der *Pinus sylvestris* Probe 0DG0102f (roter Pfeil) am Standort Kammerlöcher, Arnstadt, Thüringen.
- Abb. 55: Dünnschnitt der freigelegten *Pinus sylvestris* Wurzelprobe 0DG0102f, Standort Kammerlöcher, Arnstadt, Thüringen. Zu erkennen ist die deutliche Strukturveränderung 1958. Die Diagramme zeigen die Reduktion der Größe der Frühholzzellen ab 1959 und somit die Freilegung der Wurzel in diesem Jahr.
- Abb. 56: Schematische Darstellung der Veränderung der Zellstruktur im Jahrring einer Wurzel in unterschiedlichen Tiefen / bei Annäherung an die Oberfläche getrennt nach Früh- und Spätholz. **A:** Einheitliche Wurzelstruktur unterhalb 12cm Bodentiefe. **B1:** Veränderungen im Bereich 12 – 10cm Bodentiefe. **B2:** Veränderungen zwischen 10 – 0cm Tiefe. **C:** Veränderung nach Freilegung.
- Abb. 57: Schematische Darstellung Veränderung der Wurzelstruktur durch eine Freilegung. **A:** Wurzel im Substrat. **B:** Moment der Freilegung. **C:** Freigelegt.

- 
- Tab. 1: Strukturen des Wurzelholzes, die nach einer Freilegung Veränderungen in der Ausprägung aufzeigen. Die Strukturen sind entsprechend der grundlegend möglichen Einflußfaktoren dargestellt.
- Tab. 2: Auflistung der Hauptstandorte der vorliegenden Untersuchung entsprechend der jeweiligen Gebiete und Prozessbereiche.
- Tab. 3: Darstellung der acht-stelligen Probencodierung für Stammproben
- Tab. 4: Beispiel einer Tabelle zur Auflistung makroskopisch erkennbarer Veränderungen der Jahrringstruktur
- Tab. 5: Diagnostische Merkmale bei schneller und kontinuierlicher Freilegung von *Larix decidua*, *Picea abies* und *Pinus cembra* Wurzeln.

## 1 Einführung

Im Rahmen der Naturgefahren- und der Erosionsforschung ist die Rekonstruktion vergangener Ereignisse als Grundlage fundierter Prognosen zukünftiger Entwicklungen unterschiedlichster Prozeßsysteme von ebensolcher Bedeutung wie die Erfassung der aktuellen Systemzustände (MESSERLI et al. 2000). Vor dem Hintergrund der Diskussion über die Auswirkungen des globalen Klimawandels (IPCC 1996a, 1996b) und der daraus resultierenden Umweltveränderungen auf die Frequenz und Magnitude unterschiedlichster Massenbewegungen zeigt sich vermehrt die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Methoden zur Erfassung und Quantifizierung vergangener wie auch rezenter Prozesse. In diesem Zusammenhang spielen dendrogeomorphologische Methoden der Datierung und Prozeßrekonstruktion in der Geomorphologie aufgrund ihrer jahrgenaue Auflösung eine zunehmend wichtige Rolle (BRÄUNING 1995). Die Grenzen dieser inzwischen standardisierten Methoden sind aber derzeit dadurch gegeben, daß sich die Untersuchungen fast ausschließlich auf Auswertungen spezieller Wachstumsreaktionen im Stammholz der Bäume konzentrieren. Häufig auftretende Störungen des Wurzelraumes durch erosive Prozesse können nur dann rekonstruiert werden, wenn sie sich direkt auf das Stammwachstum auswirken (BÉGIN et al. 1991a). Neben der Altersbestimmung von Adventivwurzeln (STRUNK 1995) befaßten sich nur wenige Arbeiten mit Untersuchungen zur Eignung von Wurzeln im Rahmen geomorphologischer Forschung. Vereinzelt Arbeiten zur Nutzung des Alters freigelegter Wurzeln zur Bodenabtragsrekonstruktion (LAMARCHE 1968) und daran angelehnte Versuche der Bestimmung diagnostischer Merkmale einer Freilegung in der Jahrringstruktur entsprechender Wurzeln (FAYLE 1968) zeigten mehrfach das Potential einer intensiveren Nutzung von Baumwurzeln zur Prozeßrekonstruktion. Alle Versuche einer entsprechenden Merkmalsbestimmung sind bisher allerdings gescheitert, wodurch das Potential einer Wurzelanalyse nicht ausgeschöpft werden konnte.

Die Bestimmung diagnostischer Merkmale einer Freilegung in der Jahrringstruktur freigelegter Koniferenwurzeln im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieses schlummernde Potential der Wurzelanalyse hinsichtlich detaillierter Prozessrekonstruktionen bergen. Holzanatomische Analysen der Wurzelsysteme sind dabei auch vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Diskussion über die Einschränkung der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Rolle der Wälder als Kohlenstoffsenke zu sehen. Die Gewichtung der Wurzelsysteme im Rahmen der Biomassenbestimmung (CURT et al. 2001) ist noch weitgehend ungeklärt. Auch dies beruht unter anderem darauf, daß bisher keine eindeutigen Informationen über unterschiedliche Ausprägungen der Wurzelstrukturen vorliegen.

## 1.1 Stand der Forschung und spezielle Problematik

Bereits in der Mitte des neunzehnten Jahrhunderts beschäftigten sich die Forstbotaniker Theodor und Robert Hartig mit der Analyse möglicher Auswirkungen unterschiedlicher Umweltfaktoren auf die Jahrringbildung in Bäumen (HARTIG, R. 1869,1882, 1885, 1888; HARTIG, TH. 1863, 1878,).

„Die Grösse des jährlichen Zuwachses an einem Baume resp. einem bestimmten Baumtheile ist fortwährenden Schwankungen unterworfen, bedingt durch die Witterungsverhältnisse eines Jahres, durch Veränderungen in der Bodenbeschaffenheit, durch gesteigerten oder verminderten Lichtgenuss u.s.w. und überhaupt durch alle jene äusseren Einflüsse, die wir in ihrer Gesamtheit als Standortfaktoren bezeichnen.

Neben diesen schwankenden Einflüssen, die sich in der wechselnden Breite der Jahresringe äussern, ändert sich auch die Zuwachsgrösse des Baumes mit dessen Alter und zwar in Folge seiner zunehmenden Wurzelverbreitung, Blattmenge u.s.w.“ (HARTIG, R. 1882:57)

Mit der Entwicklung des Crossdating Verfahrens durch Andrew Ellicott Douglass zu Beginn des vorigen Jahrhunderts (DOUGLASS 1914, 1941) wurde dieser aus heutiger Sicht ökologisch geprägte Ansatz der Jahrringforschung für lange Zeit in den Hintergrund gedrängt (SCHWEINGRUBER 1996). Die beeindruckenden Möglichkeiten der jahrgenaue Datierung auch abgestorbener oder verbauter Stämme (DOUGLASS 1921, 1937) eröffneten neue Perspektiven vornehmlich in der Archäologie und der Paläoklimatologie. Diese Schwerpunkte der Dendrochronologie dominierten die Jahrringforschung bis in die 70er Jahre des zwanzigsten Jahrhunderts (FRITTS 1976). Wenngleich der Forstbotaniker Bruno HUBER (1941, 1951, 1961) den ökologischen Gedanken der Gebrüder Hartig wieder aufgriff, hat sich die Jahrringforschung erst in den vergangenen zwei Dekaden zu einer vielschichtigen Wissenschaft entwickelt, deren Teildisziplinen wohl am Besten durch den Begriff Dendroökologie zusammengefaßt werden (BRÄUNING 1995; SCHWEINGRUBER 1983, 1996).

In Ergänzung der Möglichkeiten der Klimarekonstruktion (Dendroklimatologie) wurde die Jahrringanalyse vor allem in den Geowissenschaften zu einer wichtigen Methode hinsichtlich der Analyse vergangener Umweltbedingungen. Die Anwendungsgebiete umfassen Gletscherrekonstruktionen (HOLZHAUSER 1987) ebenso wie die Untersuchung von Flußlaufänderungen (BAYARD & SCHWEINGRUBER 1991). Speziell in der Geomorphologie eröffnete die Jahrringanalyse (Dendrogeomorphologie) ungeahnte Möglichkeiten bezüglich der Rekonstruktion und Datierung gravitativer Prozesse (ALESTALO 1971, SHRODER 1980; SCHWEINGRUBER 1983, 1996; BRAAM et al. 1987a, 1987b). Der Anwendungsschwerpunkt dendroökologischer Forschung liegt allerdings in der Analyse der Wachstumsreaktionen des Stammholzes. Wurzelholzanalysen spielen bisher eine untergeordnete Rolle.

Dendrogeomorphologische Wurzelanalysen beschränken sich zumeist auf die Altersbestimmung von Adventivwurzeln (MARIN & FILION 1992, STRUNK 1989a, 1989b, 1990, 1991, 1995) zur Datierung von Verschüttungsprozessen wie auch auf die

Veränderungen von Küstenlinien oder Flussläufen sowie auf die daraus resultierenden Änderungen der hydrologischen Verhältnisse des Untergrundes (SIGAFOOS 1964; LAMARCHE 1966; HELLEY & LAMARCHE 1968; BÉGIN et al. 1991a,b; LEPAGE & BÉGIN 1996). Vereinzelt fand die Altersbestimmung freigelegter Wurzeln auch Eingang in die Erosionsforschung (LAMARCHE 1968). Der eigentliche Schwerpunkt liegt aber in der Untersuchung von Wurzelsystemen bezüglich der Hangstabilisierung und Bodenfixierung (NILAWEERA & NUTALAYA 1999, NORMAN et al. 1995, WATSON et al. 1999, ZHOU et al. 1997, 1998). Der Großteil heutiger Untersuchungen an Baumwurzeln konzentriert sich auf die spezielle Wurzelanatomie und –morphologie (KRÄMER et al. 1996; TAYLOR & PETERSON 2000; HAWES et al. 2000) im Hinblick auf die Versorgungsfunktion der Wurzeln für das Pflanzenwachstum (ENSTONE & PETERSON 2001, GEORGE et al. 1997; PETERSON et al. 1999, THOMAS & HILKER, 2000), ist also eher pflanzenphysiologisch ausgerichtet (GÄRTNER et al. 2001).

Die holzanatomische Analyse variabler Wachstumsreaktionen in Baumwurzeln fand, wie bereits erwähnt, bisher vergleichsweise wenig Anwendung in den Geowissenschaften. Während die anatomische Struktur des Stammholzes der Bäume (SANIO 1872, 1873, SCHWEINGRUBER 1978, 1990) sowie deren spezifische Reaktionen auf sich verändernde Umweltbedingungen weitreichend untersucht wurden (CHERUBINI et al 1997, DESPLANAQUE et al. 1999, 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). Die umfangreichen Arbeiten von CUTLER (1976, 1978) richten sich dagegen gezielt auf die Artenbestimmung durch detaillierte anatomische Untersuchungen an Wurzeln (Cutler & Richardson 1989) oder auf Auswertungen der Morphologie der Wurzelsysteme nach Windwurfereignissen (CUTLER 1988, CUTLER et al. 1989). Wenn auch in der weiten Hälfte des 19ten Jahrhunderts vergleichsweise viele, vor allem deutschsprachige Publikationen zu umweltbedingten Wachstumsreaktionen in Wurzeln verschiedener Baumarten erschienen (HARTIG, 1863, KNY 1877, 1908, SCHACHT 1860, SCHWARZ 1892, VON MOHL 1862, WIELER 1891), wurden diese Ansätze während des 20. Jahrhunderts nur noch vereinzelt aufgegriffen (BANNAN 1941, 1954, PATEL 1965, POHL 1927, RIEDL 1937).

Dies mag einerseits daran liegen, daß die vornehmlich deutschsprachige Literatur keine große Verbreitung fand, andererseits aber sicherlich daran, daß Wurzeln nicht der Atmosphäre ausgesetzt sind und somit für Klimarekonstruktionen nicht geeignet erscheinen. Hinzu kommt, daß sich die Probengewinnung gegenüber der Stammbeprobung äußerst schwierig gestaltet. Wurzeluntersuchungen blieben also eine Domäne der Pflanzenphysiologen. Ein Beispiel hierfür ist die Bibliographie von AGERTER & GLOCK (1965), die für den Zeitraum 1950 – 1962 insgesamt 94

wurzelspezifische Publikationen auflistet. Von diesen befassen sich 93 mit der Wurzelausbreitung im Untergrund in Abhängigkeit der Bodenverhältnisse wie auch dem Nährstofftransport. Lediglich eine Publikation (YOSHIDA 1960) setzt sich mit der Jahrringausprägung auseinander.

In den 60er Jahren fanden Wurzelatierungen erstmals eine konkrete Anwendung in den Geowissenschaften. LAMARCHE (1961, 1963, 1968) und EARDLEY (1967) nutzten das Alter freigelegter *Pinus aristata* Wurzeln im Verhältnis zur Distanz Wurzeloberkante – aktuelle Bodenoberfläche, um so die Abtragsrate zu bestimmen. Auch wenn sich die rekonstruierten Abtragsraten im Vergleich zu aktuellen Abtragsmessungen als überhöht erwiesen (das Wurzelalter entspricht nicht dem Freilegungszeitpunkt), erlaubt diese Methode doch eine Abschätzung der Abtragsleistung in homogen reliefierten Gebieten, die von kontinuierlicher Bodenerosion betroffen sind.

Vergleichbare Arbeiten wurden von CARRARA & CARROLL (1979) durchgeführt. Sie legten den Zeitpunkt der Wurzelfreilegung von *Pinus edulis* und *Juniperus scopulorum* mit drei Methoden fest:

- (i) Das erste Auftreten von Wurzelverletzungen.
- (ii) Auswertung der Veränderungen im Jahrringbild.
- (iii) Das erste Auftreten von Reaktionsholz.

Die Abtragsberechnung erfolgte wie bei LAMARCHE (1968) (siehe auch DUNNE et al. 1978). Anstelle des Wurzelalters wurde allerdings die Zahl der Jahre nach der postulierten Freilegung verwendet. Das Auftreten von Wurzelverletzungen wurde auch von MORNEAU & PAYETTE (1998) genutzt, um Wandlungsmuster von Karikou-Herden (*Rangifer tarandus* L.) zu rekonstruieren.

FAYLE (1968) führte die bis heute umfangreichste Untersuchung über Veränderungen in der Holzanatomie im Zusammenhang mit Wurzelfreilegungen bei verschiedenen Baumarten durch. Die theoretische Grundlage dieser Arbeit kann mit den Erkenntnissen von WIELER (1891) zusammengefaßt werden:

Der anatomische Bau des Holzes, genauer das Vorhandensein sein bestimmter Zellen wie auch die Art ihrer Ausprägung, bedingt die physikalischen Eigenschaften verschiedener Baumarten. Gleiches gilt für die physikalischen Unterschiede zwischen Stamm- und Wurzelholz einer Baumart. Nach seiner Auffassung erzeugt ein konstant unterschiedliches Milieu auch konstant unterschiedliche Strukturen. Die Ergebnisse seiner Untersuchungen an *Robinia Pseudo Acacia*, *Quercus sessiliflora*, *Populus canadensis*, *Salix alba*, *Ribes rubrum* und *Betula alba* zeigen, daß Stammkambium Wurzelholz bilden kann und umgekehrt, wenn die äußeren Bedingungen entsprechend gegeben sind (WIELER 1891:146).

Darauf aufbauend untersuchten u.a. BURGER (1930) und BANNAN (1941) die Bildung von Adventivwurzelhorizonten nach einer Stammverschüttung. Der Schwerpunkt der

Untersuchungen lag allerdings nicht in der Datierung der Verschüttungsprozesse, sondern in Wachstumsreaktionen des Stammes und Veränderungen der Gefäße der verschütteten Pflanzenteile.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse zahlreicher früherer Studien (u.a. BANNAN 1941, GLOCK et al. 1937, OMEIS 1895) konnte FAYLE (1968) Unterschiede in der Anatomie freigelegter und nicht freigelegter Wurzeln verschiedener Laub- und Nadelhölzer aufzeigen. Obwohl er zahlreiche beeinflussende Faktoren im Detail untersuchte, fand er keine spezifischen Merkmale, die den Zeitpunkt der Freilegung bestimmen.

In der heutigen Erosionsforschung (RICHTER 1998) findet die Untersuchung freigelegter Wurzeln von wenigen Ausnahmen abgesehen (DANZER 1996) kaum Anwendung. Das Problem ist darin zu sehen, daß es sich um lokale Messungen handelt, die aufgrund ihrer relativen Ungenauigkeit nicht auf regionale Abtragsraten übertragbar sind. Die Ungenauigkeit ist noch immer darauf zurückzuführen, daß keine spezifischen Merkmale der Freilegung bestimmt werden konnten.

Neuere Untersuchungen bezüglich der generellen Eignung der Wurzeljahre zur Altersbestimmung (KRAUSE & ECKSTEIN 1993, KRAUSE & MORIN 1999) haben gezeigt, daß sie auch mittels „crossdating“ zur Altersbestimmung abgestorbener Bäume herangezogen werden können (YAMAGUCHI et al. 1997). Wäre es darüber hinaus möglich, den genauen Zeitpunkt einer Wurzelfreilegung zu bestimmen, würden sich neue Perspektiven bezüglich unterschiedlichster Prozeßrekonstruktionen in der Geomorphologie ergeben.

Vor diesem Hintergrund orientiert sich die Problemstellung der vorliegenden Arbeit eng an der Bestimmung diagnostischer Merkmale für die geomorphologische Prozeßforschung. Die Auswertung der Literatur ergab eindeutige Unterschiede in der Jahringausprägung und auch der Zellstruktur zwischen freigelegten und nicht freigelegten Wurzeln verschiedener Baumarten. Diese veränderten Strukturen (zusammenfassend dargestellt in Tabelle 1) lassen sich grundlegend zwei beeinflussenden Faktoren zuordnen:

- (a) Kontakt mit der Atmosphäre (Veränderung der Licht-, Luft-, Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse)
- (b) Veränderte mechanische Belastungen (Zug- und Druckeinwirkungen)

Tab. 1: Strukturen des Wurzelholzes, die nach einer Freilegung Veränderungen in der Ausprägung aufzeigen. Die Strukturen sind entsprechend der grundlegend möglichen Einflußfaktoren dargestellt.

	<b>Kontakt zur Atmosphäre</b>	<b>Mechanischer Stress</b>
<b>Beeinflusste Struktur</b>	Zellgröße	Verletzungen (Kallusgewebe, Harzkanäle)
	Zellwandstärke	
	Anordnung der Zellen	Holzstrahlen
	Veränderung der Ausprägung der Jahringgrenze	- radial gebogen, - tangential gestaucht
	Jahringbreite / Zellanzahl	Druckholz / Zugholz
	Auskeilende Jahrringe	

Es wird deutlich, daß eine Vielzahl unterschiedlicher Reaktionen festgestellt wurde, die genaue Zuordnung einer Reaktion zu einem bestimmten auslösenden Faktor über die grundlegende Einteilung in Tabelle 1 hinaus war jedoch nicht möglich. Die bisher festgestellten Veränderungen können somit nicht als diagnostische Merkmale verwendet werden.

Die Komplexität des Wachstumsverhaltens der Wurzeln sowie anatomischer Veränderungen in Abhängigkeit variabler Umweltfaktoren macht es erforderlich, diese zum besseren Verständnis gesondert abzuhandeln (siehe Kapitel 2).

## 1.2 Hypothesen, Konzeption und Fragestellung

Das Potential der Wurzelanalyse kann nur dann voll zum Einsatz kommen, wenn man die Wachstumsgeschichte einer freigelegten wie auch die einer nicht freigelegten Wurzel im gleichen Ausmaß rekonstruieren kann. Diese Analyse muß mindestens die methodische Tiefe einer Stammanalyse erreichen. Die vorliegende Arbeit erhebt den Anspruch dieses Potential hervorzuheben.

Die zugrundeliegenden Hypothesen beziehen sich auf die in Tabelle 1 aufgeführten Umgebungsfaktoren und Merkmale der Wurzelholzanatomie.

- (i) Es existiert eine „normale“ Wurzelstruktur, die man in bestimmten Grenzen definieren kann und die sich in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen verändert.
- (ii) Wenn anatomische Veränderungen dokumentiert werden können, ist es möglich sie soweit einzugrenzen, daß der Zeitpunkt der Freilegung datierbar wird.
- (iii) Die genaue Dokumentation der Geländesituation bei der Probenahme sowie die Bestimmung der die Wurzel beeinflussenden geomorphologischen Prozesse muß jeder Wurzelanalyse vorangestellt werden. Erst dadurch wird die Merkmalsfestlegung möglich.

(iv) Wurzeln reagieren ebenso schnell auf Umweltveränderungen wie der Stamm, wodurch sich abrupte Veränderungen der Umgebungsbedingungen von kontinuierlichen Prozessen unterscheiden lassen.

Diese Hypothesen erfordern eine besondere Herangehensweise an die aufgezeigte Problematik. Ziel ist es, durch die Berücksichtigung der jeweiligen Geländesituation die entsprechenden Merkmalsausprägungen im Jahrringbild (Querschnitt, siehe Abbildung 2, Kapitel 2.2) unter holzanatomischen Gesichtspunkten zu definieren. Die Konzeption der Arbeit muß also klar eingegrenzt werden. Dies betrifft zunächst die Auswahl der Baumarten. Hierbei stützt sich die Eingrenzung (a) auf holzanatomische Grundlagen und (b) auf geomorphologische Erwägungen.

Zu (a): Das Holz der Laubbäume unterscheidet sich anatomisch deutlich von dem der Nadelbäume. Zudem zeigen einzelne Arten unterschiedliche Strukturausprägungen. Diese sind bei den Laubhölzern wesentlich heterogener als bei Nadelhölzern. Dies spricht für eine Beschränkung auf Nadelhölzer.

Zu (b): Der Prozeß der Freilegung scheint entscheidenden Einfluß auf die Zellreaktionen zu haben. Aufgrund der Vielfalt geomorphologischer Prozesse (vor allem das häufige Auftreten schneller Massenbewegungen, die zu einem abrupten Wechsel der Wachstumsbedingungen führen) erscheint ein alpiner Untersuchungsraum am geeignetsten. Alpine Standorte sind von Nadelhölzern dominiert, deshalb spricht auch dieser Punkt für ihre Verwendung.

Eine Dominanz einzelner Umweltfaktoren bezüglich der strukturellen Veränderungen ist nicht bekannt (vergleiche Kapitel 2.4). Sich im Rahmen der weiteren Untersuchungen auf einen Faktor (z.B. Lichteinfluß) zu beschränken, würde bedeuten die zahlreichen anderen Einflüsse de facto auszuschließen. Die Arbeit verfolgt demnach das Ziel, alle Faktoren gleichgewichtet zu berücksichtigen. Zu Gewährleistung dieser Gleichgewichtung wird zunächst eine Baumart an vergleichbaren, aber bezüglich der Prozesse inhomogenen Standorten untersucht.

Eine umfassende Instrumentierung aller zu untersuchenden Bäume der verschiedenen Standorte zur Erfassung aller Faktoren (u.a. Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen, Bodenwassergehalt, Bodendruck, Lufttemperatur in Bodennähe, Einstrahlungsverhältnisse) ist nicht möglich und, solange die spezifischen Merkmale der Wurzelanatomie nicht bekannt sind, auch nicht sinnvoll. Eine Instrumentierung kann somit nicht Gegenstand dieser Arbeit sein.

Diese zuvor beschriebene Situation erfordert ein deskriptives Herangehen an die Bestimmung der Einflußfaktoren über eine Kombination der gefundenen Merkmale mit der geomorphologischen Geländeansprache.

Die resultierenden Fragestellungen können demnach wie folgt definiert werden:

1. Gibt es charakteristische holzanatomische Merkmale in den Wurzeln einer Baumart anhand derer sich der Freilegungszeitpunkt bestimmen läßt? Wenn es diese Merkmale gibt, lassen sie sich entsprechend auf andere Baumarten übertragen?
2. Existieren Unterschiede der Merkmalsausprägung in Abhängigkeit der an der Freilegung beteiligten geomorphologischen Prozesse?
3. Ist es möglich anhand spezifischer anatomischer Merkmale auf die Art des Freilegungsprozesses zu schließen?
4. Läßt sich anhand der Geländesituation eine Dominanz bestimmter beeinflussender Faktoren festlegen?

### **1.3 Arbeitsstrategie**

Die Möglichkeit der Bestimmung diagnostischer Merkmale der Wurzelfreilegung erfordert gegenüber der bisherigen Praxis eine neue Herangehensweise (Abbildung 1). Da das die Wurzel umgebende Milieu ausschlaggebend für die strukturelle Ausprägung ist, muß zunächst die Auswahl des Untersuchungsraumes festgelegt werden. Die Art und Häufigkeit der dort dominierenden geomorphologischen Prozesse sollte weitgehend bekannt sein, um auftretende Milieuveränderungen einem bestimmten Prozessen zuordnen zu können. Eine gezielte Suche nach schnell freigelegten Wurzeln, die eine rapide Änderung ihrer Umweltbedingungen erfahren haben, wird dadurch vereinfacht. Da ein abrupter Milieuwechsel die stärksten Strukturveränderungen nach sich ziehen müßte, erscheint dies als vielversprechendste Grundlage für einen weiteren Vergleich der Strukturen mit denjenigen nicht beeinflusster Wurzeln der gleichen Baumart. Die Ergebnisse dieses Vergleichs werden dann Wurzelstrukturen gegenübergestellt, die eine Veränderung durch kontinuierliche Veränderungen der Umgebungssituation aufzeigen.

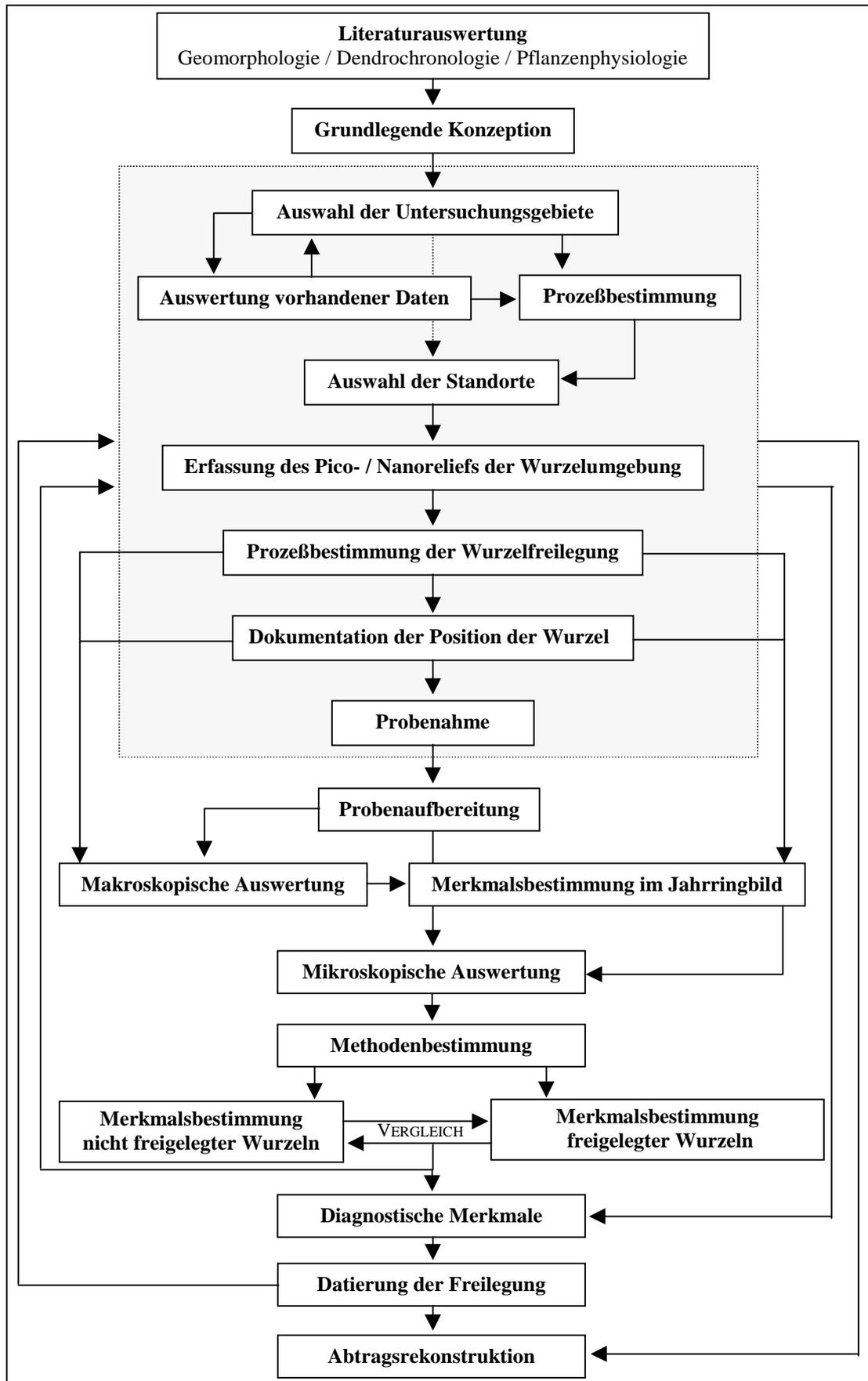


Abb. 1: Fließdiagramm der grundlegenden Arbeitsschritte der Untersuchung.

Die daraus resultierende Beprobungsstrategie stützt sich nicht nur auf eine genaue Dokumentation der Lage der Wurzel zum Zeitpunkt der Probennahme, sondern auch auf eine Rekonstruktion der Situation vor dem zu bestimmenden Freilegungsprozeß. Die Probennahme selbst wird dabei nicht nur auf die freigelegten Teile einer Wurzel beschränkt. Vielmehr werden auch die angrenzenden Bereiche, welche nach wie vor ungestört im Substrat verblieben sind, zur vergleichenden Analyse entnommen.

Die Eignung einer Wurzel für die angestrebten Auswertungen wird dadurch bestimmt, daß sie nur abschnittsweise freigelegt wurde. Die Lage der Wurzelspitze sollte nach wie vor unverändert im Substrat erhalten sein, um grundlegende Veränderungen beispielsweise der Nährstoffzufuhr auszuschließen. Dadurch wird eine Beschränkung auf unmittelbar auf die freigelegten Teile einwirkende externe Faktoren möglich. Nach ersten Auswertungen und Merkmalsbestimmungen werden die Untersuchungen auf andere Gebiete wie auch Freilegungsprozesse ausgedehnt.

## 2 Wurzelwachstum und Freilegungsreaktionen

### 2.1 Wurzelfunktionen

Die Bedeutung der Wurzeln sowie deren Funktionen für die Existenz der Landpflanzen lässt sich am deutlichsten durch die Betrachtung ihrer evolutionären Entwicklung verstehen, die u.a. bei HARPER et al. (1991) und KUTSCHERA et al. (1997) zusammenfassend dargestellt wird. Die Hauptfunktionen des Wurzelsystems heutiger Landpflanzen werden allgemein in drei Kategorien eingeteilt (VON GUTTENBERG 1968, RAVEN 1988, SITTE et al. 1998):

- Die Verankerung der Pflanze im (und/oder am) Substrat,
- die Absorption von Wasser und Nährsalzen sowie
- der Transport dieser Stoffe zum Stamm.

Bezieht man diese Kategorien auf den Wachstumsverlauf einer Wurzel, erscheint es notwendig, die Funktionen differenzierter und in der Reihenfolge ihres ersten Auftretens zu betrachten. Demnach gliedern sich die Hauptaufgaben der Wurzeln wie folgt (nach KUTSCHERA et al. 1997):

- Aufnahme überschüssiger Assimilate des Sprosses.
- Stoffausscheidung über die Wurzelspitze zur Mineralstoffanreicherung im umgebenden Substrat.
- Aufnahme von Wasser und Mineralstoffen sowie deren Weiterleitung zum Spross.
- Speicherung von zugeleiteten Assimilaten des Sprosses, aufgenommenem Wasser und der darin gelösten Stoffe.
- Verankerung der Pflanze im Substrat (verstärkte Ausbreitung).
- Richtungswachstum, gesteuert durch externe Faktoren (siehe Kapitel 2.3).
- Symbiosen mit Bakterien und Pilzen zur Bindung von Luftstickstoff sowie zur Nährstoffgewinnung aus umgebenden organischen Substanzen des Bodens.
- Assimilation von CO<sub>2</sub> und/oder O<sub>2</sub> sowie Austausch dieser Stoffe mit dem Spross.

Darüber hinaus werden im Wurzelmeristem Phytohormone (vor allem Auxine, Gibberelline und Cytokinine) gebildet, die über das Xylem den oberirdischen Pflanzenteilen zugeführt werden (ROBERTS et al. 1988, ROBERTS & HOOLEY 1988, RUSSELL 1977). Im Allgemeinen sind diese Funktionen bei Bodenwurzeln gleichmässig über das Wurzelsystem verteilt. Häufig treten jedoch Spezialisierungen auf, die sich in der Dominanz einer der drei Hauptfunktionen äussert.

## 2.2 Wurzelwachstum

Das Wachstum einer Wurzel stellt während der Lebensdauer eines Baumes einen kontinuierlichen Prozess dar, der allerdings durch äussere Einflüsse (z.B. extreme Trockenheit, niedrige Temperaturen im Boden) unterbrochen werden kann. Der primäre Bau (embrionale Entwicklung) der Wurzeln soll hier nur grob umrissen werden. Die für die vorliegende Arbeit relevanten Details werden an entsprechender Stelle ausgeführt. Darüber hinaus sei an dieser Stelle auf die pflanzenphysiologische Fachliteratur verwiesen (BIDWELL 1991, HOPKINS 1995, LIBBERT 1987, RAVEN et al 1988, RUHLAND 1956, SALISBURY & ROSS 1992, SITTE et al. 1998, TAIZ & ZEIGER 1998, VON GUTTENBERG 1961, 1968).

Koniferen, wie auch dicotyle Pflanzen besitzen ein allorhizes Wurzelsystem. Es wird zunächst die Primärwurzel gebildet, die als Pfahlwurzel senkrecht nach unten wächst. An dieser entstehen dann Seitenwurzeln (Sekundärwurzeln), die sich ihrerseits unter der Bildung von Tertiärwurzeln weiter verzweigen. Dabei zeigen die Primär- und Sekundärwurzeln genau wie der Stamm sekundäres Dickenwachstum.

Der grundlegende Aufbau des Wurzelholzes der Koniferen ist dem des Stammes vergleichbar (Abbildung 2).

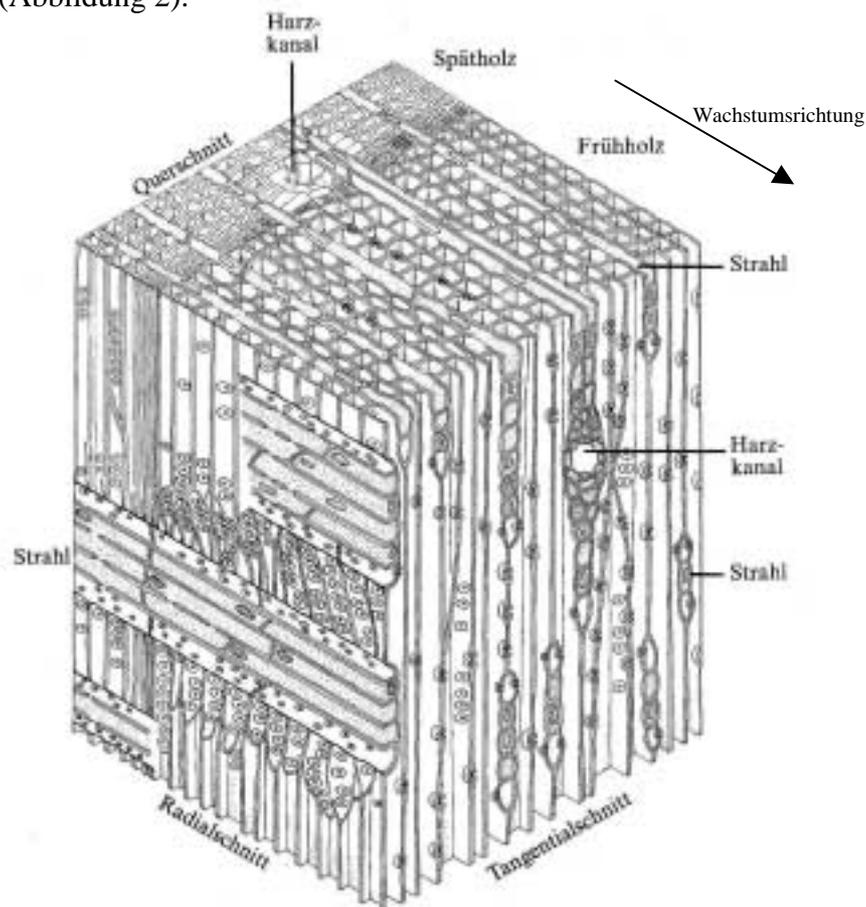


Abb. 2: Blockdarstellung des sekundären Xylems (Stamm) von *Pinus strobus* unter Angabe der Hauptschnitttrichtungen für die Präparation. Die Ausprägung der Zellen im Querschnitt ist grundlegend vergleichbar mit dem Zellaufbau der Wurzel. (Quelle: RAVEN et al. 1988:531)

Im Gegensatz zum Holz der Laubbäume, das durch Tracheen und Tracheiden aufgebaut wird, ist das Holz der Nadelbäume vergleichsweise einfach strukturiert. Es besteht aus Tracheiden, im Jahrring läßt sich Früh- und Spätholz deutlich unterscheiden. Auch wenn die sekundären Xylemzellen der Wurzeln im Detail gegenüber den Zellen des Stammes variieren (u.a. Größe, Zellwandstärke, Anzahl), ist die grundlegende Ausprägung gleich.

Das Längenwachstum der Wurzel konzentriert sich ausschliesslich auf den Bereich der Wurzelspitze, speziell auf die Streckungszone (Abbildung 3A). Die Entwicklungsunterschiede zum Spross sind in Abbildung 3B dargestellt, wobei das deutlichste Unterscheidungsmerkmal nach dem Beginn des sekundären Dickenwachstums darin zu sehen ist, daß Wurzeln kein Mark (von getrennten Leitbündeln umgebene Grundgewebezellen) ausbilden, sondern einen Zentralzylinder, d.h. primäre Xylem- und Phloemzellen werden vom Perizykel (Parenchymschichten zwischen Endodermis und Leitgewebe) umhüllt.

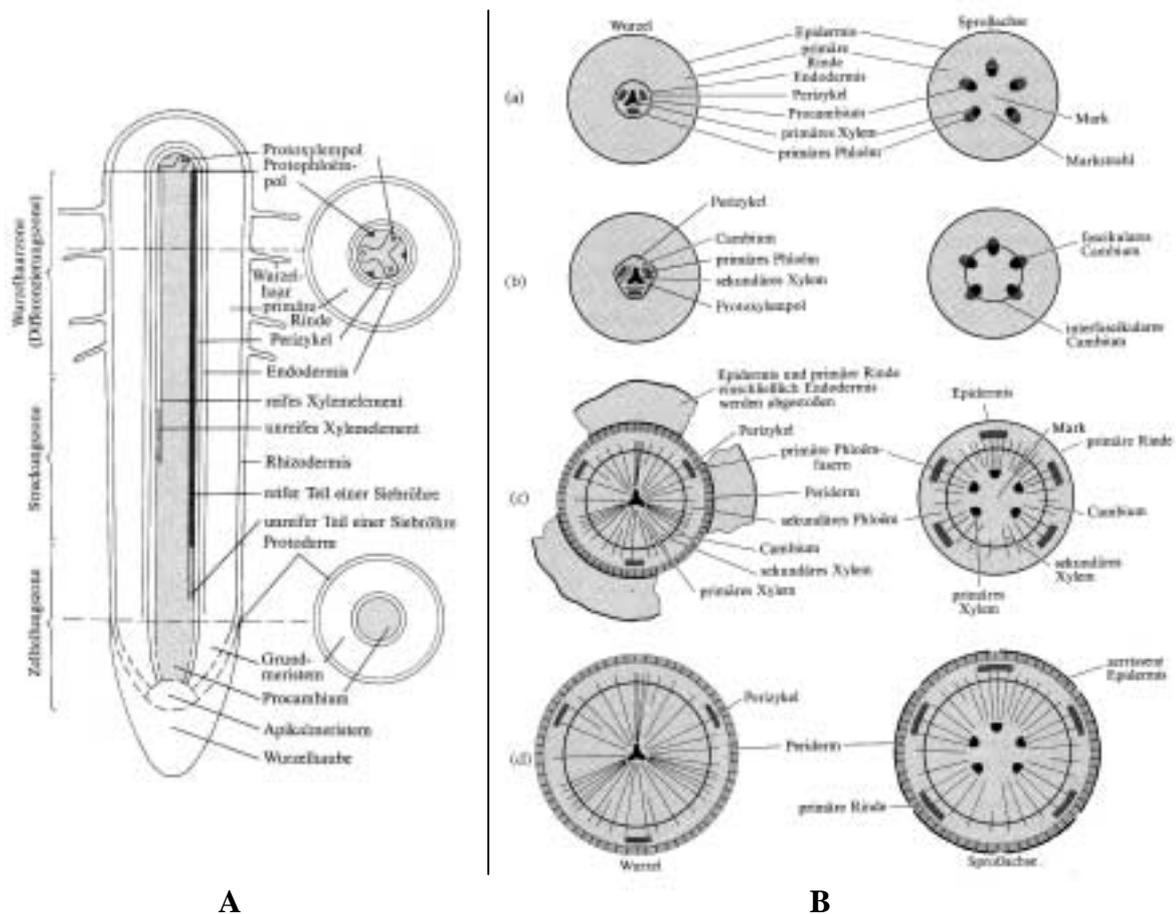


Abb. 3: **A)** Schematische Darstellung der frühen Entwicklungsstadien einer Wurzelspitze. **B)** Vergleich der Primär- und Sekundärstruktur von Wurzel und Sprossachse am Beispiel einer dikotylen Gehölzpflanze. a) Nach Ende des primären Wachstums, b) Kambiumentstehung, c) Bildung von sekundärem Xylem und Phloem, d) Nach einjährigem Wachstum (Quelle: A: RAVEN et al. 1988: 471, B: RAVEN et al. 1988: 520).

Das Durchdringen des Untergrundes wird durch die Kalyptra (Wurzelhaube, Abbildung 2A), die das Apikalmeristem der Wurzelspitze umhüllt und schützt, erleichtert. Die Wurzelhaube sondert dabei Zellen ab, die ihrerseits ein stark hydratisiertes Polysaccharid ausstossen. Diese pektinöse Substanz bildet Tröpfchen, die der Wurzel als Gleitmittel das Eindringen in den Untergrund vereinfacht (RAVEN et al. 1988). Eine weitere wichtige Funktion der Wurzelhaube ist neben der bereits erwähnten Phytohormonproduktion die Perzeption der Erdanziehungskraft (Gravitropismus) wie auch chemischer Substanzen (Chemotropismus), die das Richtungswachstum der Wurzeln massgeblich steuert.

### 2.3 Wurzelausbreitung im Untergrund

Im Gegensatz zu Tieren, die sich frei in ihrer Umwelt fortbewegen können, sind höhere Pflanzen durch ihre Wurzelbildung ortsgebunden. Um diesen "Nachteil" auszugleichen, verfügen Pflanzen über verschiedene Möglichkeiten der Anpassung an sich verändernde Umweltbedingungen. Diese Anpassungsmöglichkeiten äussern sich zumeist in verändertem Wuchsverhalten.

Es handelt sich hierbei um sogenannte *Tropismen*, dies sind Krümmungsbewegungen, die durch einen einseitigen, externen Reiz ausgelöst und in ihrer Richtung bestimmt werden. Art und Richtung der

Bewegung, die durch unterschiedlich starkes Wachstum gegenüberliegender Seiten eines Organs entstehen, sind vom Reiz abhängig und somit in Stärke und Ausrichtung variabel. Tropismen gehen auf Wachstumsvorgänge zurück, somit sind nur wachstumsfähige Organe und/oder Organteile tropistisch reaktionsfähig. Dominierend ist häufig einseitiges Streckungswachstum (Abbildung 4), im Falle von schräggestellten Baumstämmen sind aber auch Plasmawachstum und Zellteilungen mit beteiligt. Erfolgt die Krümmung in Richtung des Reizes, spricht man von *positiven*, umgekehrt von *negativen Tropismen*. Nimmt das reagierende Organ einen bestimmten Winkel zur Reizrichtung ein, bezeichnet man dies als *Plagiotropismus*, beträgt der Winkel zum Beispiel  $90^\circ$  spricht man von Transversal-Tropismus (RAVEN et al. 1988; SITTE et al. 1998).

Die Verbreitung der Baumwurzel im Untergrund wird vorwiegend durch Tropismen gesteuert, die auf die Nährstoffverteilung (flüssig und gasförmig) und das Schwerfeld der Erde ausgerichtet sind (PORTERFIELD & MUSGRAVE, 1998).

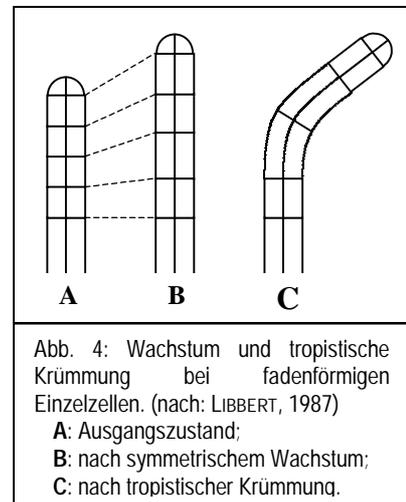


Abb. 4: Wachstum und tropistische Krümmung bei fadenförmigen Einzelzellen. (nach: LIBBERT, 1987)  
 A: Ausgangszustand;  
 B: nach symmetrischem Wachstum;  
 C: nach tropistischer Krümmung.

Die weithin bekannteste Art der Tropismen ist der *Phototropismus*. Pflanzen die nur einseitig beleuchtet werden, richten sich mit der Krümmungsbewegung ihrer Sprossachse und auch der Blattstiele in Richtung der Lichtquelle aus (*positiver Phototropismus*). Wurzeln sind im allgemeinen durch ihre Lage im Substrat keiner Beleuchtung ausgesetzt und zeigen keine Reaktion auf Lichtreize, sie sind *aphototrop*. Allerdings gibt es auch hier einige Ausnahmen, die im Gegensatz zu den Pflanzenteilen der Sprossachse, den eher selten auftretenden *negativen Phototropismus* zeigen (Abbildung 5). Diese Reaktion tritt bei Haft- und

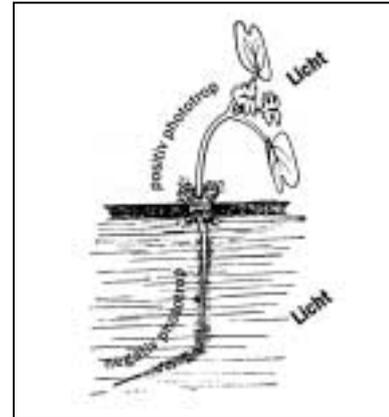


Abb. 5: Senfkeimling in Wasserkultur.  
Sprossachse positiv phototrop,  
Wurzel negativ phototrop.  
Blattspreite transversal-phototrop  
(nach: SITTE et al., 1998)

einigen Luftwurzeln auf (Efeu, Araceen), die direkt dem Licht ausgesetzt sind, aber auch bei Keimwurzeln einiger weniger Pflanzen wie zum Beispiel den Senfkeimlingen (*Sinapis*), deren Wurzeln in Wasserkultur belichtet negativ phototrop reagieren (SITTE et al., 1998). Zusätzlich kann das Wellenspektrum des Lichtes unterschiedliche Einflüsse haben. So wachsen präparierte Luftwurzeln von *Vanilla planifolia* unter dem Einfluss von weißem und blauem Licht senkrecht nach unten (negativ phototrop), während sie unter rotem, orangem und grünem Licht horizontal wachsen, wie sie es auch bei Lichtausschluss tun (IRVINE & FREYRE 1961). Bei der Entwicklung und Ausbreitung eines Baumwurzelsystems hingegen spielt der Phototropismus, wie bereits erwähnt, nur eine untergeordnete Rolle. Weitere Einflussmöglichkeiten des Lichtes auf die Zellstruktur und die Jahrringausprägung der Baumwurzeln werden in Kapitel 2.4.1.4 beschrieben.

### 2.3.1 Gravitropismus

Seit Beginn des 19ten Jahrhunderts ist bekannt, dass der Einfluss der Gravitation, ebenso wie der Einfluss des Lichtes, in der Entwicklung der Pflanzensysteme eine entscheidende Rolle spielt (KNIGHT 1806). Demnach orientiert sich das Wachstum einer Pflanze am Schwerfeld der Erde, nicht etwa senkrecht zur örtlichen Ausprägung der Oberfläche, wobei die genaueste senkrechte Orientierung dann erreicht wird, wenn überlagernde phototrope Einflüsse fehlen (LIBBERT 1987). Dieser Gravitropismus ist bei der Ausbreitung der Wurzelsysteme im Gegensatz zum Phototropismus von entscheidender, wenn auch nicht alleiniger Bedeutung (REID et al. 1991). Bei Laub- wie

auch Nadelbäumen reagieren die Hauptwurzeln zumeist positiv gravitrop, während die Seitenwurzeln 1. Ordnung plagiogravitrop und die Seitenwurzeln 2. Ordnung sogar agravitrop sind (LIBBERT 1987, WILSON 1970). Dies ist neben anderen, teilweise überlagernden Stimuli hauptverantwortlich für die morphologische Ausprägung der Wurzelsysteme.

Bereits Ende des 19ten Jahrhunderts wurde durch CIESIELSKI (1872) und DARWIN (1880) die Wurzelspitze als zentrales Organ der Schwerkraftwahrnehmung identifiziert (BJORKMAN 1988, CHEN et al. 1999, MOORE & EVANS 1986). Verantwortlich für die Perception des Schwerereizes sind im Allgemeinen Statolithen im Cytoplasma der Wurzelhaubenzellen. Es handelt sich dabei um stärkehaltige Plastiden, sogenannte Amyloplasten die entsprechend der Ausrichtung der Zelle (Statocyte) auf der unteren Zellwand lagern und dort durch ihren Stärkegehalt einen gewissen Druck ausüben. Ändert sich die Ausrichtung der Wurzelspitze, kommt es auch zu einer schwerkraftbedingten Umverteilung der Statolithen (Abbildung 6), wodurch sich ein Gradient wachstumsregulierender Substanzen in der Wurzelhaube einstellt.

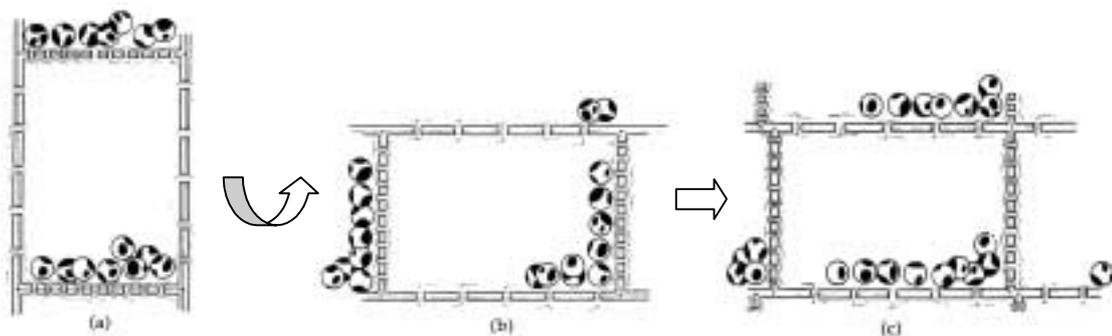


Abb. 6: Reaktion der Statolithen (⊙) auf die Schwerkraft: a) senkrecht nach unten wachsende Wurzel; b) Drehung der Wurzel um 90°; c) die Amyloplasten gleiten infolge der Schwerkrafteinwirkung zu den ehemals vertikalen Zellwänden (Quelle: RAVEN et al. 1998: 564 (verändert)).

Wahrscheinlich bewirkt diese Umverteilung die Deformation einer zellularen Struktur und löst somit eine physikalische Reaktion aus. Untersuchungen von CASPAR und PICKARD (1989) an einer stärkefreien Mutante von *Arabidopsis* zeigten dagegen ebenfalls eine gravitrope Reaktion, obwohl die Amyloplasten nicht auf der unteren Zellwand sedimentierten. KISS et al. (1989) konnten allerdings nachweisen, dass die gravitrope Reaktion der Mutante sehr viel schwächer ausfiel und durchaus auf die Amyloplasten zurückzuführen war, die trotz der fehlenden Stärke eine relativ hohe Dichte besitzen. Ergänzend zur Statolithen-Theorie werden auch Statolithen unabhängige Reizmodelle untersucht (BJORKMAN 1988, Reid et al. 1991), die sich auf Zugunterschiede in den Membranen der oberen und unteren Zellwände, Druckunterschiede durch das Gewicht des Zellplasmas oder die Wirkung des gesamten Zellgewichtes auf die untere Zellwand beziehen. Diese sind für die

Reaktionsholzbildung mechanisch belasteter Wurzelteile von Bedeutung. Neuere Untersuchungen (HODICK et al. 1998, SIEVERS et al. 1996) belegen aber die Dominanz der Statolithen-Theorie während des Längenwachstums, wobei die Bewegungen der Statolithen sowie die Auswirkungen auf die Filamente des Cytoskeletts der Zelle auf deren Positionierung detailliert unter dem Lichtmikroskop untersucht wurden.

Die nach der Perzeption des Schwerereizes ausgelösten Wachstumsunterschiede konzentrieren sich auf die Streckungszone der Wurzel und sind hormonell gesteuert (REID et al. 1991). Das Krümmungswachstum der Streckungszone wird hauptsächlich durch eine ungleiche Anreicherung von Auxin (Indol-3-essigsäure –IES–) auf der physikalischen Unterseite der Wurzel ausgelöst (RUSSELL 1977, ROBERTS & HOOLEY 1988). Zu dieser Anreicherung kommt es nach der Reizung durch kalziumunterstützten basipetalen Längstransport von IES von den medianen Wurzelhaubenzellen zur Streckungszone (CHEN et al. 1999). Während Auxin im Spross die Zellstreckung fördert, ist die Wirkung in der Wurzel genau entgegengesetzt, die Zellstreckung wird gehemmt, wodurch die Oberseite, auch unter dem Einfluss der Gibberilline im Verhältnis stärker wächst. Die genauen Mechanismen der gravitopen Reaktion, vor allem auch die lange umstrittene Rolle des Auxins sind Gegenstand intensiver Forschung und können an dieser Stelle nicht weiter verfolgt werden. Es sei deshalb neben den bereits aufgeführten Publikationen auf die spezielle Fachliteratur verwiesen (u.a. KONINGS 1995, RASHOTTE et al. 2000, TASAKA et al. 1999).

Obwohl gravitropen Reaktionen als Grundlage der Ausprägung der Wurzelsysteme gesehen werden müssen, sind sie doch nicht die alleinigen Faktoren der Wurzelausbreitung. Ein bisher wenig untersuchtes Beispiel ist der Exotropismus (Abbildung 7). Dabei behält eine Wurzel nach dem Umwachsen eines Hindernisses im Boden (Blöcke, Mauern, etc.) die zuvor angestrebte Wuchsrichtung bei (WILSON 1967). Weiterhin

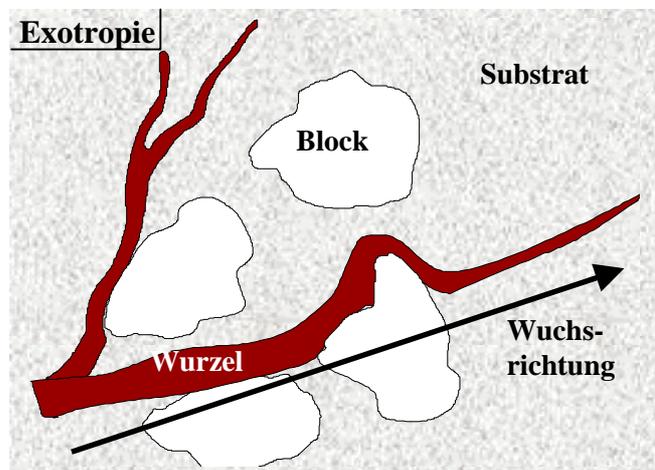


Abb. 7: Darstellung des exotropen Wachstums einer Wurzel (Aufsicht). Die Wurzelspitze behält nach dem Umwachsen eines Hindernisses ihre ursprüngliche Wuchsrichtung bei.

entscheidend für die detaillierte Ausprägung eines Baumwurzelsystems ist die Stoffverteilung im Boden, auf welche die chemotropen Reaktionen zurückzuführen sind.

### 2.3.2 Chemotropismus

Chemotrope Reaktionen sind Wachstumskrümmungen, die durch eine ungleiche Verteilung chemischer Substanzen (gelöst oder gasförmig) in dem die Wurzelspitze umgebenden Substrat ausgelöst werden. Die Richtung wird dabei durch den Konzentrationsgradienten dieser Stoffe bestimmt (RAVEN et al. 1988, SAMMETT 1905, SITTE et al. 1998). Hohe O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub> Konzentrationen im Boden können den gravitropen Reaktion der Wurzel entgegenwirken (Aerotropismus) (BENNETT 1904, MOLISCH 1884). Neuere Untersuchungen bezüglich der O<sub>2</sub>-Reaktionen (Oxytropismus) (PORTERFIELD & MUSGRAVE 1998) haben gezeigt, dass die Sauerstoffkonzentration im Boden eine entscheidende Rolle in der Wurzelorientierung spielen kann. Gleiches gilt für die Perzeption von Wasser oder Wasserdampf (Hydrotropismus) als Gegenspieler zum Gravitropismus (TAKAHASHI & SCOTT 1991).

## 2.4 Reaktionen auf veränderte Umweltbedingungen

Klimaveränderungen bewirken grundlegend auch Veränderungen im Bodenwasserhaushalt. Dieser ist abhängig von der Temperatur und der Niederschlagsmenge, sowie deren räumlicher und zeitlicher Verteilung. Erhöhte Temperaturen bedingen eine erhöhte Evaporation und setzen somit die Wasserverfügbarkeit für Pflanzen im Boden herab. Dadurch wird auch die Nährstoffversorgung der Pflanze über die Wurzeln beeinträchtigt (Trockenstress). Dies wird allerdings zu einem gewissen Grad durch eine Erhöhung der Bodentemperatur gepuffert, da biologische und chemische Mineralisierungsprozesse positiv mit der Bodentemperatur korreliert sind.

Intensivere Niederschläge dagegen verringern die Sauerstoffverfügbarkeit im Boden (Anaerobiose), wodurch eine Schädigung der Wurzeln eintritt.

Beide Faktoren, Trockenstress und Sauerstoffmangel, führen zu einer Verringerung der Standfestigkeit bei Bäumen. Daraus resultiert eine erhöhte Windwurfgefahr und als Folge auch eine Verstärkung der Erosion.

Veränderungen des Klimas, d.h. langfristige Veränderungen der Temperatur und Niederschlagsverhältnisse wirken sich also auf das Wachstum und die Entwicklung der Wurzeln aus. Steuernder Faktor ist die Lufttemperatur, die sich in Abhängigkeit der Tiefe auf die Bodentemperatur auswirkt. Bei ausreichender Tiefenlage der Wurzel (>15 - 20 cm) haben kurzfristige Schwankungen der Lufttemperatur keinen Einfluss auf das Wachstum der Wurzel. Die Temperaturbedingungen bleiben über längere Zeiträume relativ konstant, das Wachstum der Wurzeln wird dominant durch die Wasser- und damit Nährstoffverfügbarkeit gesteuert.

Baumwurzeln bleiben also von Veränderungen der Witterungsverhältnisse unbeeinflusst, ganz im Gegensatz zum Stamm oder den Ästen. Werden die Wurzeln allerdings freigelegt, sind auch sie, neben den veränderten mechanischen Bedingungen und Druckverhältnissen, den Schwankungen der Temperatur und auch der Einstrahlungsverhältnisse direkt ausgesetzt. Solche Veränderungen üben einen spezifischen Stress auf die Wurzeln aus.

Bei Stress handelt es sich nach LARCHER (1987) um den Beanspruchungszustand eines Organismus, der zunächst Destabilisierung, dann Normalisierung und Resistenzsteigerung bewirkt, bei Überschreiten der Anpassungsfähigkeit und Überforderung der Reparaturmechanismen zum Absterben der ganzen Pflanze oder Teilen davon führt. (Ein biologisches Stresskonzept wurde erstmals von SELYE (1936) formuliert, durch den Pflanzenphysiologen LEVITT (1972) auf Pflanzen übertragen und durch LARCHER (1987) weiterentwickelt (BRUNOLD et al, 1996) ).

Im Folgenden wird die Auswirkung der Umgebungsveränderungen auf das Wurzelwachstum näher betrachtet.

### 2.4.1 Strukturelle Variationen

Wie bereits zuvor erwähnt, existiert bis heute keine eindeutige Definition einer „normalen“ Wurzelstruktur, wenn auch die anatomischen Besonderheiten vielfach hervorgehoben werden (CUTLER 1976, CUTLER et al. 1987). Speziell bei Koniferen gilt die Aussage, dass Wurzeltracheiden im Vergleich zu den Stammtracheiden länger sind (SANIO 1872, OMEIS 1895, BANNAN 1965) und einen größeren Durchmesser wie auch dünnere Zellwände aufzeigen (TIMELL 1986, TORREY & CLARKSON 1975, WHITTINGTON 1969). Der Durchmesser der Tracheiden steigt mit zunehmendem Abstand zur Wurzelbasis. Weiterhin weist ESKILSSON (1969) daraufhin, dass auch zwischen den Tracheiden der Feinwurzeln und der Skelettwurzeln vergleichbare Unterschiede bestehen. Aufgrund der daran angepaßten Feststellung, daß freigelegte Wurzeln ein eher stammähnliches Wachstum aufzeigen, erscheint es hier notwendig, grundlegend die bekannten Veränderungen in Abhängigkeit der sie auslösenden Faktoren aufzuzeigen. Bei diesen Faktoren handelt es sich neben den Veränderungen des Bodendruckes, der Luftzirkulation und der Feuchtigkeitsverhältnisse hauptsächlich um Variationen der mechanischen Belastung, der Lichtverhältnisse und vor allem der Temperaturverhältnisse. Die diesbezüglich umfangreichsten Arbeiten wurden durch FAYLE (1968, 1975a, 1975b, 1975c, 1976) durchgeführt, weshalb sich auch viele der nachfolgend aufgeführten Merkmale auf seine Untersuchungen beziehen.

#### 2.4.1.1 Bodendruck

Die Veränderung der Druckverhältnisse der Wurzelumgebung wurde durch FAYLE (1968) untersucht, indem er einige ca. 20cm tief gelegene *Pinus* Wurzeln (genaue Bezeichnung der Art fehlt) über einen schmalen Zugang unterirdisch freilegte. Somit sollte die einzig einwirkende Umgebungsveränderung der fehlende Bodendruck sein. Es ergab sich aber nur eine 1,2-fache Steigerung des zu erwartenden Zuwachswertes (siehe Abbildung 8, Kapitel 2.4.1.4). Er folgert daraus, dass Druckveränderungen nicht der dominante Faktor für die Zuwachssteigerungen nach einer Freilegung sein können. Die mechanischen Veränderungen, die durch die Entkopplung vom Substrat auftreten müssen wurden dabei allerdings nicht berücksichtigt.

#### 2.4.1.2 Luftzirkulation

Wie bereits in Kapitel 2.3.3 aufgezeigt wurde, reagieren Wurzeln auf veränderte Bedingungen der Sauerstoff- oder CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Boden. Allerdings beziehen sich alle diesbezüglichen Untersuchungen auf das Längenwachstum und damit auf die Wurzelausbreitung, nicht auf das sekundäre Dickenwachstum. Veränderungen der Luftzirkulation durch Freilegung wurden bisher kaum berücksichtigt. FAYLE (1968) schließt Veränderungen in der Luftzufuhr als beeinflussenden Faktor aus, da viele der

untersuchten nicht freigelegten Wurzeln nur einige Zentimeter unter der Oberfläche in einem lockeren Sandboden wuchsen und somit keine deutliche Veränderung der umgebenden Luftbedingungen gegeben scheint. Nicht berücksichtigt wurde dabei allerdings, dass eine Veränderung der Luftzirkulation die Umgebungstemperatur der Wurzel beeinflussen können. Man muss sie somit zumindest als sekundären Faktor berücksichtigen.

#### 2.4.1.3 Mechanischer Stress

Ein Großteil der neueren Untersuchungen hinsichtlich mechanischer Einflüsse auf das Wurzelwachstum bezieht sich neben der bereits erwähnten Bodenstabilisierung auf die Baumstabilität selbst (COUTTS et al. 1999, LINDSTRÖM & RUNE 1999, NICOLL & RAY 1996, STOKES 2000, WATSON 2000). Untersuchungen über mechanische Einflüsse auf den Strukturverlauf entlang der Achse einer Wurzel sind dagegen meist auf ältere Publikationen beschränkt. Im Bereich des Wurzelanlaufes muss mit einem überproportionalen Einfluß mechanischer Belastungen durch den Stamm gerechnet werden. Nach Fayle (1968, 1976) dominieren die stark veränderten mechanischen Belastungen im Bereich des Wurzelansatzes den Lichteinfluss nach der Freilegung (u.a. starke Druckholzbildung). Folglich sollte dieser Bereich für die Analyse der Wachstumsveränderungen durch Freilegung ausgespart werden.

LÄMMERMAYR (1901) postuliert, daß das Wurzelwachstum der Koniferen (nach der Wurzelbasis) auf der Unterseite am stärksten ist. Differenziertere Untersuchungen zeigen allerdings, daß sich verstärktes Wurzelwachstum in genügender Entfernung zur Wurzelbasis auf verschiedenen Seiten abwechselt (u.a. FAYLE 1968, KNY 1908, TIMELL 1986). Verantwortlich sind variable Druckbelastungen im Boden. So kann beispielsweise Bodenkompromierung oder -auflockerung durch Wühltiere entlang der Wurzel ausgeglichen werden. Gleiches gilt für Einflüsse durch Frosthieb oder Feuchtevariationen in tonigen Böden. Wächst die Wurzel nahe der Oberfläche und das stärkste Wachstum liegt auf der Unterseite, kann die Wurzel angehoben werden. Nach TIMELL (1986) wurden trotz zahlreicher Untersuchungen Druckholzerscheinungen in nicht freigelegten Wurzeln mit einer Ausnahme (bei *Tsuga canadensis* Wurzeln durch WESTING, dokumentiert bei TIMELL 1986:936) nie nachgewiesen (u.a. ONAKA 1949). Auch seine eigenen Untersuchungen an *Larix decidua*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris* und *Tsuga occidentalis* ergaben keinen Nachweis für das Auftreten von Druckholzzellen. Die aufgezeigten Exzentrizitäten resultierten aus einseitigen Zuwachssteigerungen, deren Zellen zwar stärker ausgeprägte Zellwände zeigten, sonst aber keiner der Kriterien der Druckholzdefinition (COTÉ & DAY 1965) gerecht wurden. Auch spätere Arbeiten über Jahrringbreitenvariationen in Wurzeln (u.a. KRAUSE & ECKSTEIN 1994, KRAUSE & MORIN 1999) sprechen von wechselnden Zuwachsrichtungen, nicht von

Reaktionsholz (weder Zug- noch Druckholz). Freigelegte, mehr oder weniger horizontal verlaufende Wurzeln von *Pinus banksiana*, *Pinus sylvestris*, *Pinus resinosa*, *Picea clauca* und *Tsuga canadensis* hingegen zeigen eindeutige Druckholzbildungen. (FAYLE 1968, 1976, TIMELL 1986, WESTING 1965).

#### 2.4.1.4 Licht

Bezüglich der direkten Auswirkungen unterschiedlicher Belichtungen auf die Holzanatomie gibt es nur sehr wenige Arbeiten, die sich zumeist auf das Stammholz beziehen. So konnten LIESE & DADSWELL (1959) wie auch SCHULTZE-DEWITZ (1965) nachweisen, dass die Faserlänge (u.a. von *Pinus radiata*) auf der Sonnenseite des Stammes im Durchschnitt kürzer ist als auf der Schattenseite. Gleiches gilt für die Faserlängen von *Pinus sylvestris* (LIESE & AMMER 1962). Allerdings wurden diese Veränderungen nach eingehender Prüfung eher den unterschiedlichen strahlungsbedingten Temperaturverhältnissen zugeschrieben. FAYLE (1968) fand vergleichbare Längenreduktionen in freigelegten Wurzeln, macht allerdings nicht alleine den Lichteinfluß dafür verantwortlich, sondern eher Veränderungen des Umgebungsdruckes (Druck der Borke durch höhere Temperaturen und stärkere Austrocknung) und der Phytohormonverhältnisse. SCHULTZE-DEWITZ (1965) stellte fest, dass es bei Polarkiefern keine Längenunterschiede zwischen Sonnen- und Schattenseite gibt. Er folgert daraus, dass der UV-Anteil des Lichtes, nicht die IR-Strahlung (Wärmestrahlung) für eine schnellere Ausdifferenzierung der sonnenseitigen Zellen in Gebieten mit Tag- und Nachtwechsel ausschlaggebend ist. Temperaturunterschiede wurden dabei allerdings nicht berücksichtigt.

Um den Einfluss des Lichtes auf das Breitenwachstum der Wurzeln zu überprüfen, legte FAYLE (1968) einige *Pinus sylvestris* (PISY) und *Pinus banksiana* (PIBA) Wurzeln in einem Mindestabstand von einem Meter zum Stammansatz oberirdisch frei. Um den Lichteinfluß zu prüfen, wurden die freigelegten Wurzelteile für die Dauer eines Jahres mit unterschiedlichen Materialien umhüllt. Dies waren einerseits lichtundurchlässige Folien zur Kontrolle der Einflußstärke anderer Faktoren, andererseits Folien unterschiedlicher Farbspektren:

Die mit lichtundurchlässigen Folien umhüllten Wurzelteile zeigten nur eine ähnlich schwache Steigerung im Zuwachs wie die unterirdisch freigelegten Wurzeln (Aluminium 1,2; schwarze Plastikfolie 1,3) (Abbildung 8). Als mögliche Ursache der Steigerung vermutet er erhöhte Temperaturen gegenüber den nicht freigelegten Wurzelteilen sowie zu einem geringen Anteil den fehlenden Bodendruck. Weiterhin verweist er auf die Zunahme radial abgeflachter Zellen am Ende der Wachstumsperiode.

Die Zuwachssteigerungen unter klarer Plastikfolie, die das gesamte sichtbare Lichtspektrum passieren lässt, waren bei beiden Baumarten deutlich (PIBA 2,0; PISY 2,5). Zusätzlich ergaben Versuche mit roter und blauer Plastikfolie klare Unterschiede in der Wachstumssteigerung bei vergleichbarer Lichtintensität. Beide Arten reagierten stärker auf den Einfluss des roten Lichtspektrums (PIBA 2,5; PISY 4,1) als auf den des blauen Lichtes (PIBA 1,4; PISY 2,0) wobei festzuhalten bleibt, daß *Pinus sylvestris* am sensitivsten reagiert.

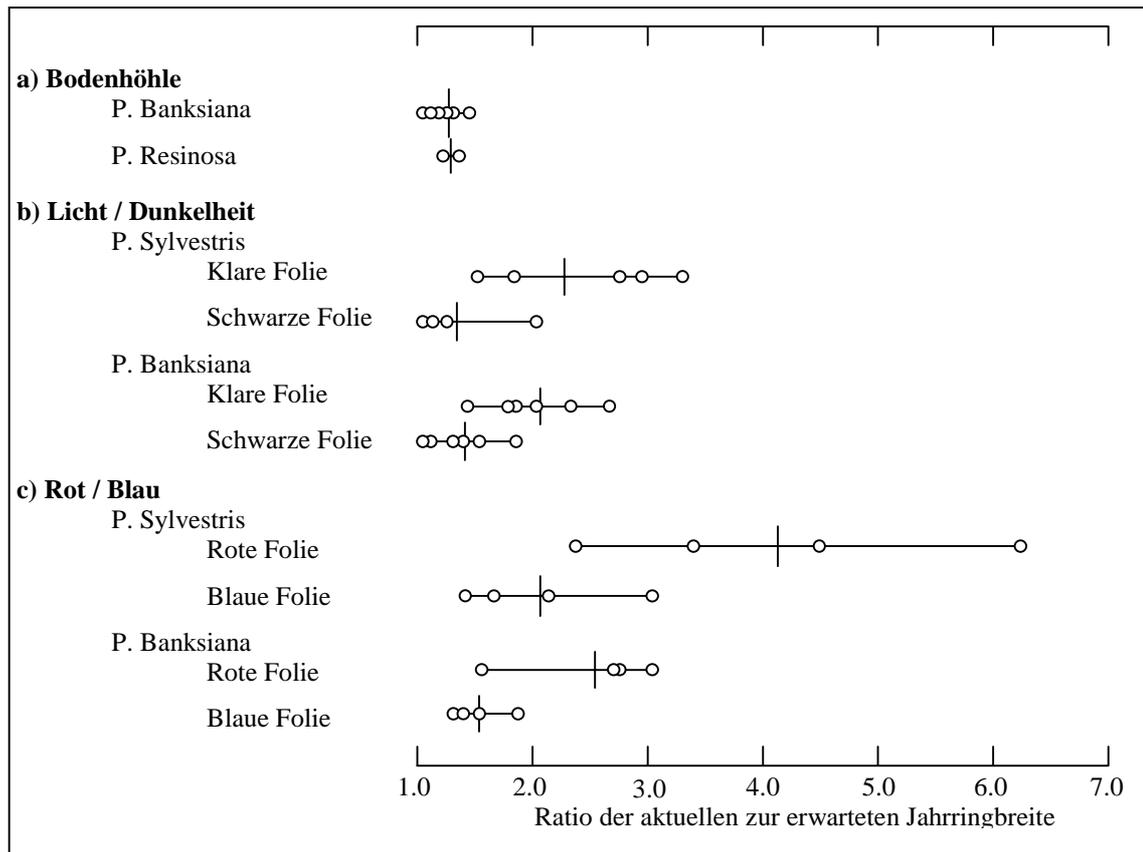


Abb. 8: Darstellung der Zuwachssteigerungen der Jahrringbreite unter verschiedenen Lichteinflüssen nach einem Jahr der Freilegung. Der Steigerungswert bezieht sich auf das Verhältnis der gemessenen Jahrringbreite nach der Freilegung zu dem erwarteten Wert bei nicht Freilegung. Die erwarteten Werte beziehen sich auf den Durchschnitt der zuvor gebildeten Jahrringe im unveränderten Medium. (Quelle: FAYLE 1968:38).

Die Umhüllungsversuche zeigten außerdem, dass die Bildung von Druckholzzellen freigelegter Wurzeln nach einer Abdeckung mit schwarzem Plastik fast vollständig unterbunden wurde. Eine Veränderung der mechanischen Bedingungen ist dabei auszuschließen. Dies stützt die Ergebnisse, wonach in nicht freigelegten Wurzeln keine eindeutigen Druckholzzellen nachgewiesen werden konnten. Lichteinwirkung hat also eindeutig eine Wirkung auf die Ausbildung der Zellen. Welche Rolle die Wärmestrahlung dabei spielt ist aber ungeklärt.

Nach Untersuchungen von KRAMER & KOZLOWSKI (1960) sind die Plastiden der Wurzelzellen einiger Baumarten (z.B. Pinus) in der Lage bei Belichtung Chlorophyll zu produzieren. Die Folge ist eine Grünfärbung der inneren Schichten der Borke. Die unter normalen Bedingungen in den Wurzelzellen gebildeten Leukoplasten sind für die Reservestoffspeicherung in den Zellen verantwortlich. Werden diese Zellen dem Licht ausgesetzt, können bei folgenden Zellteilungen Chloroplasten entstehen, die photosynthetisch aktiv sind. Diese Eigenschaft ist genetisch gesteuert und beruht auf der Tatsache, dass sich alle Plastidenformen durch Teilung ineinander umwandeln können (SITTE et al. 1998).

Die Borke normaler (im Substrat befindlicher) Baumwurzeln ist nur sehr dünn ausgebildet ist, erscheint die Umwandlung der Plastiden durch Lichteinwirkung nach einer Freilegung plausibel. Ist diese allerdings stärker ausgebildet, beschränkt sich die Chlorophyllbildung ausschließlich auf Bereiche an denen die Borke stark aufgerissen ist (FAYLE 1968). Somit scheint die photosynthetische Aktivierung der Plastiden direkt von der Ausprägung der Borke abhängig zu sein.

#### 2.4.1.5 Temperatur

Die Temperaturverteilung in Böden ist von deren Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, der Bodenfarbe, Bodenbedeckung, Exposition und Neigung wie auch den Verdunstungsverhältnissen abhängig (MÜCKENHAUSEN 1982). Grundlegend nehmen die Schwankungen der Tagestemperatur mit zunehmender Tiefe schnell ab. So sind sie bei mittelschweren Böden in einer Tiefe von 20cm nur noch sehr gering, ab 60cm nicht mehr relevant. Bedeutender sind die Schwankungen der Temperatur im Jahresgang (Abbildung 9). Daraus wird deutlich, dass die Freilegung einer Wurzel starke Veränderungen der Temperaturbedingungen nach sich zieht.

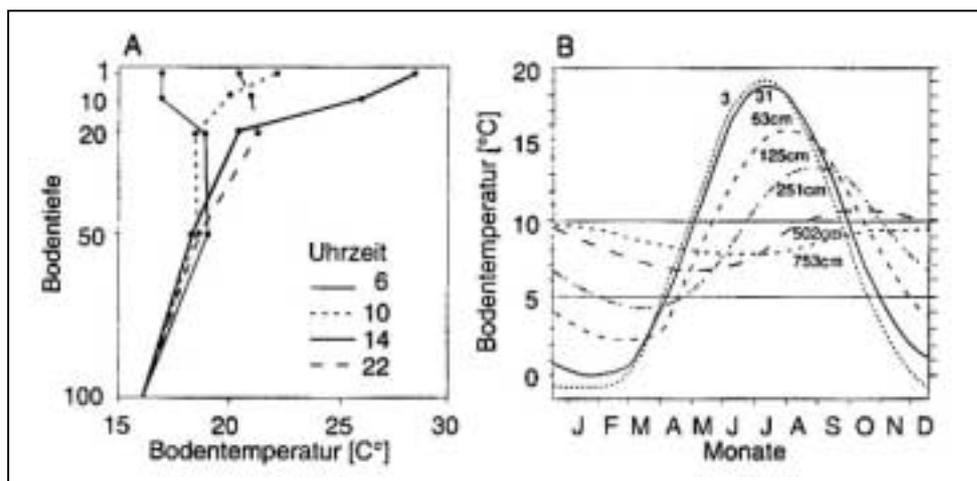


Abb. 9: Temperaturverlauf im Boden. A: Sommertemperaturisochronen im unbedeckten Boden. B: Jahresgang der Temperatur in verschiedenen Bodentiefen (nördliches Europa). Quelle: LARCHER 1987: 55)

Zelllängenveränderungen in Abhängigkeit der Temperatur wurden u.a. von RICHARDSON (1964) untersucht. Danach bewirkt eine Erhöhung der Nachttemperaturen von 10°C auf 30°C eine Steigerung der Zelllängen um ca. 30%. Veränderungen der Zellwandstärke wie auch des Zelldurchmessers (Stammholz) ergaben zwar jeweilige Steigerungen dieser Parameter in Abhängigkeit steigender Temperaturen, jedoch ergaben sich keine Korrelation der beiden Parameter zueinander. Diese Veränderungen sind nach RICHARDSON (1964) eher multikausal. Steigerungen der Auxinwerte, Längenwachstum der Stämme, Photosyntheseraten, Blattausbildung oder die Stellung des Baumes im Kollektiv, um nur einige zu nennen, müssen für klare Aussagen berücksichtigt werden. Zur Struktur der Wurzelholzzellen sind bisher keine vergleichbaren neueren Arbeiten bekannt. Bezüglich der Wurzelraumtemperatur konzentrieren sich neuere Untersuchungen auf den Einfluß der Temperaturverhältnisse auf das Pflanzenwachstum. Nach LYR (1996) liegen die idealen Temperaturen für ein optimales Wachstum (in Wechselwirkung mit der Photosyntheserate) von *Picea abies*, *Larix decidua* und *Pinus menziesii* bei ~15°C. gleiches gilt für *Pinus sylvestris* (LYR & GARBE 1995).

### 3 Daten

Die vorliegende Arbeit erfordert eine besondere Herangehensweise an die Auswertung der Wachstumsreaktionen freigelegter Wurzeln. Diese basiert hauptsächlich auf der Kombination einer konzeptionellen geomorphologischen Prozessmodellierung (Rekonstruktion) mit einer genauen Dokumentation der Lage der zu untersuchenden Wurzeln vor der Probenentnahme. Die Bedeutung (a) der gezielten Auswahl eines Probenstandortes, (b) der Dokumentation u.a. geologischer, klimatologischer oder pedologischer Informationen des Gebietes wie auch (c) die ausführliche Beschreibung der bei der Auswertung angewandten Methoden in der Jahrringforschung ist bekannt (MÄKINEN & VANNINEN 1999, SCHWEINGRUBER et al. 1990, STOKES & SMILEY 1968) und wird gerade im Hinblick auf die Anwendung in den Geowissenschaften verstärkt angemahnt (ESPER & GÄRTNER 2001).

Vor allem in der Dendrogeomorphologie ist diese Vorgehensweise bezüglich Stammanalysen als grundlegend notwendig anerkannt.

Hinsichtlich der Wachstumsreaktionen freigelegter Baumwurzeln wurden diese Punkte bisher aber nicht oder nur unzureichend berücksichtigt. Darin ist auch der Grund zu sehen, dass sich die vorliegende Arbeit nicht auf bereits vorhandene Datensätze stützen kann. Der bis dato übliche einfache Vergleich der Zellstrukturen freigelegter und nicht freigelegter Wurzeln wird hier als unzureichend erachtet.

Die Art der Datenerhebung umfaßt folglich neben der Beprobung von Wurzeln unterschiedlichster Lage vor allem auch die ausführliche Dokumentation der oben aufgeführten Punkte (a - c), die den grundlegenden Rahmen der späteren Auswertungen bilden.

#### 3.1 Untersuchungsgebiete und Material

Die Datenerhebung erfolgte in vier Untersuchungsgebieten der Schweizer Alpen, innerhalb derer 13 Einzelstandorte für die Beprobung ausgewählt wurden. Ergänzend wurden zwei Untersuchungsgebiete in Deutschland ausgewählt und dabei vier Standorte beprobt (Tabelle 2). Die Vorgabe, Wurzelfreilegungen unterschiedlichster Art zu erfassen und die jeweiligen Reaktionen auszuwerten schliesst die Auswahl eines einzigen, homogenen Standortes grundlegend aus. Trotzdem wurde versucht, die Standorte bezüglich der zu untersuchenden Baumarten, des Substrates, wie auch der Exposition für die erste Phase der Beprobung in der Schweiz so einheitlich wie möglich zu wählen. Unterschiedliche Höhenlagen der einzelnen Standorte wie auch Unterschiede in der Bestandesdichte wurden bei der Auswertung berücksichtigt.

Tabelle 2: Auflistung der Hauptstandorte der vorliegenden Untersuchung entsprechend der jeweiligen Gebiete und Prozessbereiche.

Gebiet	Prozessbereich					
	Murrinne	Murkegel	Talhang	Böschung	Lawinenbahn	Schichtstufe
<b>Mattertal</b>	Ritigrabe Birchbach Täschgufer Wildibach	Große Grabe Wildibach		Straße St.Niklaus- Grächen		
<b>Turtmantal</b>			Hungerlitälli	Wanderweg Hungerlitälli	Gruben	
<b>Blatten</b>	Bruchi	Bruchi				
<b>Lötschentel</b>			Trogschulter (Gassenried)			
<b>Wetterstein- gebirge</b>					Reintal	
<b>Thüringen</b>						Eschwege Bleicherode Arnstadt

Die bereits erläuterte Arbeitsstrategie stellt bestimmte Anforderungen an die Untersuchungsgebiete. Es muss sich dabei zunächst um Gebiete mit relativ einheitlichem Baumbestand handeln, in denen Massenbewegungen mit starker Erosionsleistung dominieren.

Diese Vorgabe schließt einen Beginn der Untersuchungen in deutschen Mittelgebirgen weitgehend aus. Alpine Untersuchungsgebiete erscheinen entsprechend den Vorgaben für die geplanten Arbeiten am geeignetsten (Abbildung 10).

Murrinnen sind aufgrund der Ereignishäufigkeit, der räumlichen Verteilung wie auch der mitunter starken Erosionsleistung ein vielversprechender Ausgangspunkt, vor allem dann, wenn die Transportstrecke ein waldbestandenes Areal durchquert.

Murgänge sind schwerkraftinduzierte, schnelle Massenbewegung, bestehend aus einem Gemisch von Feststoffen aller Größen, Wasser und Luft, deren Fliesseigenschaften mit dem jeweiligen Wasser- und Tongehalt, den Korngrößen und deren Sortierung variieren (VARNES 1978). Sie nehmen eine Zwischenstellung zwischen einer Rutschung und fluvialen Sedimenttransport ein (COSTA 1984, HAEBERLI 1988, JOHNSON & RODINE 1984, PIERSON & COSTA 1987) und werden im Rahmen verschiedener Prozessklassifikationen den Fliessprozessen zugeordnet (VARNES 1978, DIKAU et al. 1996a).

Die angesprochene Erosionsleistung bietet einerseits ideale Voraussetzungen für abrupte Veränderungen der Wurzelumgebung, andererseits aber führt sie häufig zu einer totalen Freilegung und Zerstörung der Wurzelspitze, wodurch die gesamte Wurzel abstirbt. Die Analyse der Freilegungsreaktionen erfordert jedoch eine partielle Freilegung durch einen bekannten Prozess mit anschliessend mehrjährigem ungestörten

Wachstum. Die Beschränkung auf einen einzelnen Standort erscheint somit nicht sinnvoll, da die Wahrscheinlichkeit einer partiellen Freilegung ohne Zerstörung des Kambiums gegenüber einer völligen Zerstörung der Wurzel relativ gering ist.

Die nachfolgende Beschreibung der Untersuchungsgebiete beschränkt sich auf die Vorstellung der Hauptuntersuchungsgebiete Mattertal und Turtmanntal in der Schweiz sowie der Besonderheiten der Wellenkalkschichtstufe in Thüringen, da sich die nachfolgend vorgestellten Ergebnisbeispiele auf diese Gebiete beziehen.

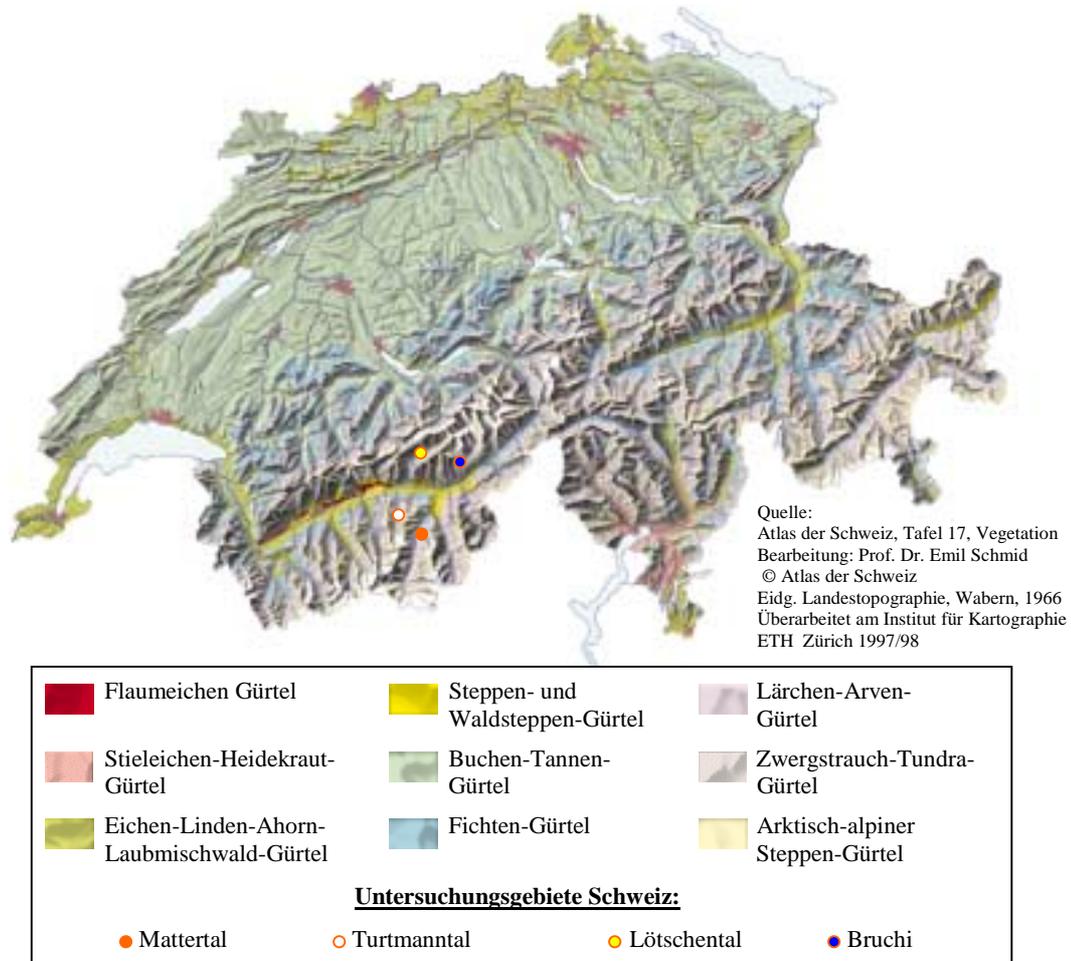


Abb. 10: Vegetationskarte der Schweiz und Lage der Untersuchungsgebiete. Die Vegetationsgliederung erfolgt durch Zusammenfassung der Pflanzenarten mit gleicher horizontaler und vertikaler Verbreitung zu Vegetationsgürteln (nach Schmid 1998).

Durch die Kenntnis der Geländegegebenheiten nahezu aller aktiven Murrinnen des Mattertals, deren Transportstrecken durch Wald verlaufen, wurde dieses Tal als Ausgangspunkt der Untersuchungen ausgewählt (Abbildung 11). Umfangreiche eigene Arbeiten bezüglich der Aktivität von 14 murfähigen Wildbächen (DIKAU et al. 1996b, GÄRTNER 1996, HOLL 1996) wie auch zahlreiche weitere Untersuchungen unterschiedlicher Prozeßsysteme dieses Gebietes (u.a. HAEBERLI 1992, LUGON &

MONBARON 1997, WEBER 1995, ZIMMERMANN & HAEBERLI 1992, ZIMMERMANN 1994) bilden eine hervorragende Basis für eine gezielte Probenauswahl.

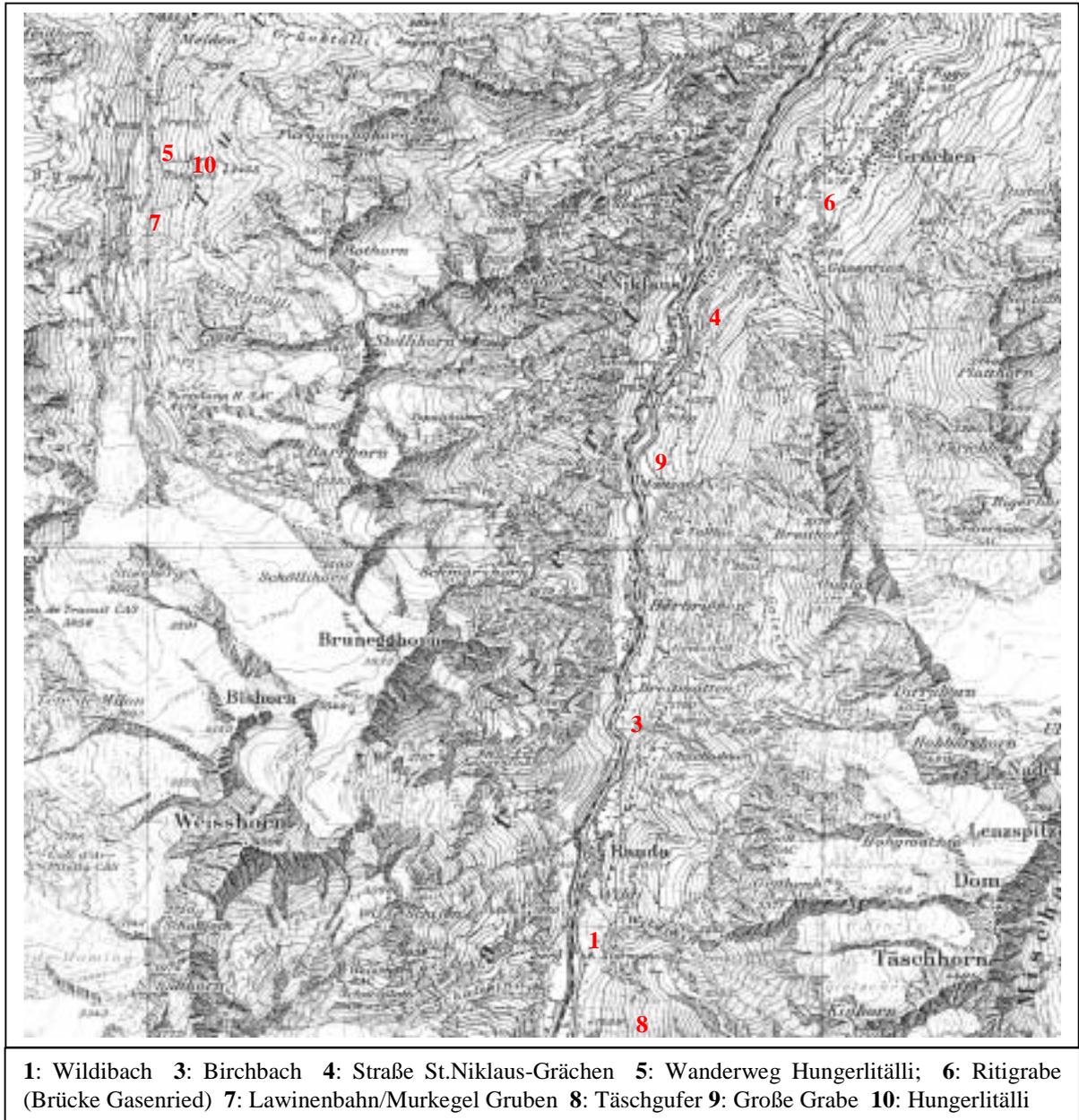


Abb. 11: Ausschnitt der topographischen Landeskarte der Schweiz 1:100 000, Valais, Wallis (105) zur Darstellung der Untersuchungsgebiete. Die eingefügten Zahlen markieren die jeweiligen Standorte der Probenahme im Mattertal (1,3,4,6,8,9) und Turmanntal (5,7,10). (Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie (BA-013691)).

Zudem ergibt sich im Mattertal die Möglichkeit, ausserhalb der aktiven Murrinnen Bereiche auszuweisen, in denen unter gleichen klimatischen wie auch pedologischen Bedingungen ein eher kontinuierlicher Abtrag vorherrscht. Dies umfaßt sowohl homogene Hanglagen als auch die Seitenwände inaktiver Murrinnen oder durch Wege- und Strassenbau übersteilte Böschungen.

Das Mattertal, mit einem Einzugsgebiet von 274 km<sup>2</sup> und einer mittleren Höhe von 2521m NN wird lithologisch von Gneisen und Schiefen der Penninischen Decke dominiert. Die gegen Westen einfallenden Gesteinsschichten begünstigen eine flachere Ausprägung der west-exponierten Hänge. Während an den steilen ost-exponierten Hängen Sturzprozesse dominieren, sind am Fuß der west-exponierten Hänge grosse waldbestandene Murkegel ausgebildet. Das Substrat der Kegel besteht ausschliesslich aus den umgelagerten Verwitterungsprodukten der kristallinen Gneise und Schiefer. Es handelt sich um eine schluffig sandige Bodenmatrix. Sie ist mit Grus und Blöcken unterschiedlicher Grösse durchmischt und weist eine geringmächtige Streuauflage auf. Deutliche Bodenbildungen sind nur vereinzelt nachweisbar.

Auch wenn detaillierte Informationen zu Niederschlags- und Temperaturverhältnissen der einzelnen Standorte (Ausnahme: Grächen) nicht vorliegen und im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden können, dürfen die grundlegenden Informationen der einzelnen Gebiete nicht ausser Acht gelassen werden.

Man muss die Tatsache berücksichtigen, dass das Mattertal eines der trockensten Täler der Schweiz ist (ZIMMERMANN et al. 1997). Der mittlere Jahresniederschlag beträgt bei Zermatt 710mm, bei Grächen 562mm (Abbildung 12).

Um den möglicherweise vorhandenen Einfluss von Trockenstress zumindest grundlegend zu minimieren, wurden die Probenstandorte nach der Auswertung der ersten Proben auf andere Täler ausgedehnt.

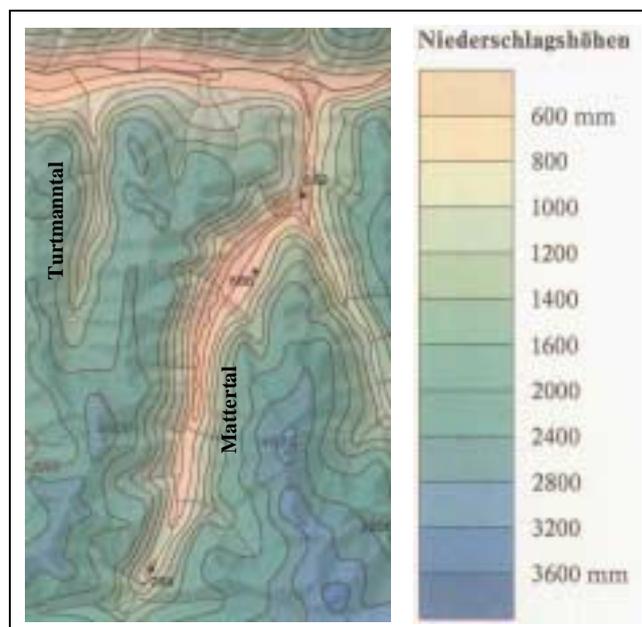


Abb. 12: Mittlere jährliche korrigierte Niederschlagshöhen der Jahre 1951 – 1980, Ausschnitt Turtmanntal und Mattertal. Quelle: Hydrologischer Atlas der Schweiz.

Hierbei handelt es sich im Besonderen um das östlich an das Mattertal angrenzende Turtmanntal. Dieses Tal ist durch die geringere Höhe der umgrenzenden Berge stärker den südwestlichen Luftströmungen ausgesetzt. Obwohl es für das Turtmanntal keine direkten Niederschlagsaufzeichnungen gibt, ist mit höheren mittleren Niederschlagswerten (um 1000mm/a) zu rechnen (Abbildung 12). Die Lithologie ist ähnlich der im Mattertal, allerdings dominieren hier neben Gneisen und Schiefen verschiedene Kalksteine.

Mehrere Geländeaufenthalte im Rahmen anderer Projekte ermöglichten darüber hinaus zusätzliche Probennahmen in weiteren alpinen Tälern der Schweiz, dem Lötschental sowie der Murrinne Bruchi im Blindtäli bei Blatten (zur Lage der Gebiete und Vegetationsverteilung siehe Abbildung 10).

Die dominierenden Baumarten der Untersuchungsgebiete der Schweiz sind *Larix decidua* Mill. (Europäische Lärche), *Picea abies* (L.) Karst. (gemeine Fichte) wie auch *Pinus cembra* ssp. *sibirica* (Arve). Das gewonnene Probenmaterial für die mikroskopische Auswertung unterschiedlicher Wachstumsreaktionen freigelegter und nicht freigelegter Wurzeln der Standorte in der Schweiz konzentriert sich auf Wurzeln dieser drei Baumarten. Im Zuge der dortigen Geländearbeiten wurden 70 Wurzeln von 42 Bäumen entnommen. Von jeder Wurzel wurden anschließend im Labor durchschnittlich fünf Querschnitte angefertigt und zur weiteren Auswertung präpariert (Anhang 1).

In Ergänzung der Untersuchungsgebiete in der Schweiz wurden zwei zusätzliche Gebiete in Deutschland ausgewählt.

Die Untersuchung einiger durch Lawinenereignisse entwurzelter Fichten im Reintal (Wettersteingebirge) während eines mehrtägigen Geländeaufenthaltes im Rahmen des DFG-Bündelprojektes SEDAG (**S**edimentkaskaden in **a**lpinen **G**eosystemen), ergab die Gelegenheit, einige während des Wachstums vermeintlich nicht freigelegte Wurzeln ohne großen Aufwand zu beproben und in die Auswertungen einzubeziehen.

Eine Besonderheit stellt das zweite Untersuchungsgebiet in Deutschland dar (Abbildung 13). Durch die Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe des DFG-geförderten Bündelprojektes MABIS (Massenbewegungen in Süd- und Westdeutschland) am Geographischen Institut der Universität Halle wurden verschiedene Standorte entlang der Wellenkalk-Schichtstufe in Thüringen in die Untersuchung einbezogen. Die Besonderheit der Standorte in Thüringen ist in der Art der auftretenden Massenbewegungen zu sehen. Es handelt sich um Kriechbewegungen von Wellenkalk-Blöcken an den Stufenrändern, in deren Folge es zu ausgedehnten Spaltenbildungen zwischen den sich ablösenden Blockschollen und dem Anstehenden kommt (BEYER & SCHMIDT 1999, JOHNSON & SCHMIDT 2000, SCHMIDT & BEYER 2001). Diese Spalten

werden vereinzelt von Baumwurzeln durchzogen. Unter Berücksichtigung der Grundlagen des Wurzelwachstums (Kapitel 2) muss davon ausgegangen werden, dass diese Wurzeln älter sind als die jeweiligen Spalten.

Eine reine Altersbestimmung dieser Wurzeln lässt also bereits auf ein Maximalalter der jeweiligen Spalte schließen (BAUM & SCHMIDT 2001). Die Auswertung struktureller Veränderungen erlaubt es jedoch, den genauen Zeitpunkt der Spaltenöffnung zu bestimmen.

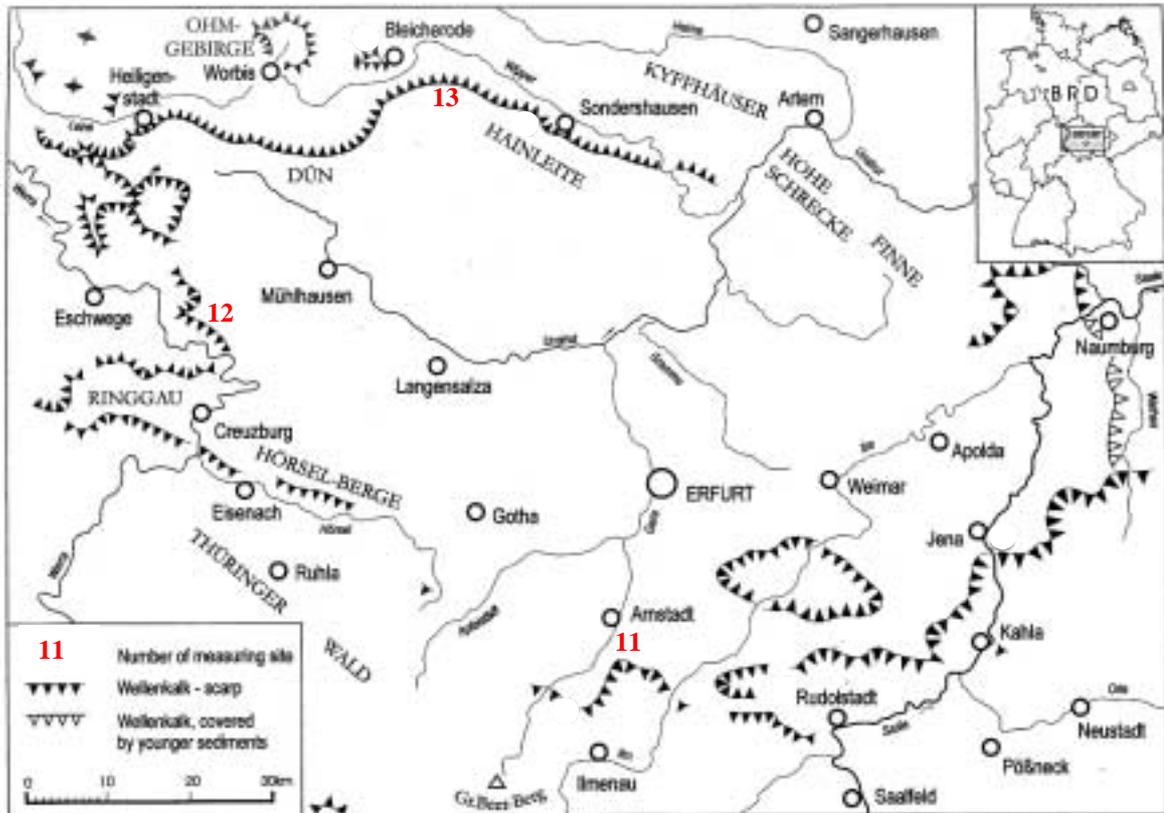


Abb.13: Darstellung der ausstreichenden Wellenkalk-Schichtstufen im Thüringer Becken sowie die Lage der Untersuchungsgebiete. **11**: Arnstadt; **12**: Eschwege; **13**: Bleicherode (Quelle: Johnsen & Schmidt 2000: 97, nach Weber 1955).

Obwohl in diesem Gebiet vornehmlich ausgedehnte Buchenwälder anzutreffen sind, konnten auch hier - neben Wurzeln von *Fagus sylvatica*, *Acer pseudoplatanus* und *Fraxinus excelsior*, die zur Altersbestimmung verwendet wurden - neun die Spalten überspannende Wurzeln von *Larix decidua* Mill. und *Pinus sylvestris* L. zur näheren Merkmalsbestimmung und Datierung der Spaltenöffnung beprobt werden (Anhang 1).

## 4 Methoden

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewandten Untersuchungsansätze basieren auf anerkannten Methoden der Geomorphologie (Geländeansprache, Prozeßbestimmung, Kartierung) wie auch der Dendrochronologie (Probengewinnung, Präparation, Auswertung). Allerdings erfordert die zu Beginn erläuterte Zielsetzung ein detailliertes Vorgehen sowohl bei der Prozeßbestimmung als auch der Auswertung der Wachstumsreaktionen, das bisher bezüglich der Analyse freigelegter Wurzeln nicht angewandt wurde.

Aus der bisherigen Beschreibung der theoretischen Grundlagen wird deutlich, daß die Ausprägung (speziell die Größe) der Wurzeltracheiden von externen Faktoren gesteuert wird. Während sich bisherige Arbeiten der Dendrogeomorphologie maßgeblich mit der Auswertung der Prozeßbereiche des Meso- und Mikroreliefs der weiteren Umgebung des zu untersuchenden Baumes beschäftigen, ist hier eine Ausdehnung auf die Strukturen des Nano- und Picoreliefs (DIKAU 1988) notwendig. Dies ermöglicht eine genaue Berücksichtigung der unmittelbaren Umgebungssituation der auszuwertenden Wurzeln. Die Einbeziehung dieser Geländeinformationen ist von großer Bedeutung bezüglich der Auswertung der untersuchten Strukturveränderungen. Die Auswahl wie auch gewisse Variationen der angewandten Methoden sind einerseits das Ergebnis vorausgegangener Literaturlauswertungen und Überlegungen bezüglich einer neuen Herangehensweise an die Thematik. Andererseits aber auch die Konsequenz der ersten Probenanalysen und Auswertungen der vorliegenden Arbeit. Aus diesem Grund wird die angewandte Methodik im Rahmen des Ergebniskapitels (Kapitel 5.7) wie auch der Diskussion (Kapitel 6) hinsichtlich ihrer Eignung, auch im Vergleich zu den bisherigen methodischen Ansätzen, diskutiert.

Die Methoden werden grundlegend in zwei Kategorien eingeteilt. Die erste Kategorie umfaßt die Geländearbeit (Prozeßbestimmung, Dokumentation und Probennahme), die grundlegend unter geomorphologischen Gesichtspunkten durchgeführt wird. Sie ist als Basis der weiterführenden zweiten Kategorie, der Laborarbeiten anzusehen. Obwohl nachfolgend die Beschreibung der Methoden nach diesen beiden Kategorien getrennt wird, müssen sie doch als Einheit im Hinblick auf die späteren Auswertungen angesehen werden.

### 4.1 Prozeßbestimmung

Im Vorfeld der Geländearbeiten werden zunächst Karten und Luftbilder der ausgewählten Untersuchungsgebiete zur vorläufigen Bestimmung einzelner Prozeßbereiche ausgewertet. Durch anschließende Geländebegehungen werden diese

Informationen verifiziert und die ausgewiesenen Prozeßbereiche nach geeigneten Standorten abgesucht. Wie bereits zuvor ausgeführt, wird die Auswahl eines Standortes im jeweiligen Untersuchungsgebiet maßgeblich durch das Vorhandensein geeigneter (teilweise freigelegter) Wurzeln bestimmt. Ist ein solcher Standort gefunden, wird zunächst der Prozeß rekonstruiert, der die Freilegung bedingte. Diese Prozeßbestimmung erfolgt über einen retrospektiven Ansatz in unterschiedlichen Skalen:

- (1) Die Erosions- und Ablagerungsformen der näheren Umgebung (Mikroskale) werden entsprechend ihrer Form und Zusammensetzung dahingehend untersucht, ob sie dem zuvor ausgewiesenen, dominanten Prozeß (z.B. Murgang) oder eher einem sekundären, nachgeordneten Prozeß (z.B. verstürzen einer übersteilten Gerinnewand) zuzuordnen sind. Diese Geländeansprache läßt erste Rückschlüsse auf die Art der Freilegung der zu untersuchenden Wurzel zu.
- (2) Die direkte Umgebung der Wurzel (Nano- bis Picoskale) wie auch deren genaue Lage werden untersucht und mit den Eigenschaften des zuvor bestimmten Prozesses der Freilegung abgeglichen.

Dieses Verfahren ermöglicht in vielen Fällen einen differenzierteren Blick auf die Art der Freilegung der Wurzel. Je nach Art des Prozesses wird somit die Bestimmung verschiedener Arten des Milieuwechsels der entsprechenden Wurzel möglich:

- (a) 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.
- (b) 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 Einschätzung der Geschwindigkeit der Freilegung und somit der Zeitfaktor, vor allem bei der Bewertung kontinuierlicher Freilegungsprozesse, ist hierbei nur sehr eingeschränkt möglich. Allerdings ist eine grobe Abschätzung in Zusammenhang mit dem zuvor bestimmten Prozeß für die spätere Auswertung und Verifikation der Freilegungsreaktionen und somit für die abschließende Datierung von Bedeutung.

## 4.2 Dokumentation und Probennahme

Die Dokumentation der Geländebefunde umfaßt neben der Erfassung der bisher erläuterten Daten eine genaue Skizze der Position der Wurzel. Diese Skizze umfaßt auch die nicht freigelegten Bereiche der Wurzel, soweit das umgebende Substrat dies zuläßt. Das heißt, die genaue Struktur der umgebenden Geländeoberfläche (Substratbeschaffenheit, Neigungen und Distanzen), die Lage des freigelegten Wurzelteils wie auch die genaue Tiefenlage der nicht freigelegten Teile der Wurzel werden auf einem eigens entworfenen Geländeerhebungsbogen (siehe Anhang 2) unter Angabe der entsprechenden Werte dokumentiert. Die Tiefenlage bezeichnet dabei die Distanz zwischen der Borke der Oberseite der Wurzel und der Bodenoberfläche.

Die detaillierte Auswertung möglicher Wachstumsveränderungen erfordert einen Einblick in den gesamten Wachstumsverlauf mehrerer Abschnitte einer Wurzel. Da die Entnahme einzelner Bohrkerns hinsichtlich des grundlegenden Charakters dieser Arbeit nur unzureichende Informationen über die Jahrringausprägung geben würde, erfordert die anschließende Beprobung die Entnahme von Scheiben aus drei Sektionen der entsprechenden Wurzel, d.h. aus

- (i) dem freigelegten Bereich,
- (ii) dem Übergangsbereich Freilegung / Substrat und
- (iii) einem ungestört im Substrat verbliebenen Abschnitt.

Die Analyse der Strukturen gleicher Jahrringsequenzen der unterschiedlichen Sektionen einer einzelnen Wurzel läßt am ehesten Unterschiede in der Merkmalsausprägung erkennen.

Soweit das umgebende Substrat Grabungen zuließ, wurden zum späteren Vergleich am gleichen Standort ungestörte Wurzeln des selben Baumes oder zumindest der gleichen Baumart entnommen, wobei auch hier die genaue Tiefenlage der Proben dokumentiert wurde.

Grundsätzlich sollte die Beprobung in einem Mindestabstand von ca. 1m vom Stammansatz durchgeführt werden, um Einflüsse des Stammanlaufes auf die Jahrringausprägung (z.B. Exzentrizität / Druckholzbildung durch Schwingungen des Stammes) auszuschließen.

Um die Arbeiten im Gelände wie auch die Scheibenentnahme zu vereinfachen, wurden die von Freilegung betroffenen Wurzeln je nach Geländesituation in Richtung des Stammes und/oder der Wurzelspitze weiter frei gegraben und als Ganzes entnommen. Um die Orientierung der jeweiligen Wurzeln später rekonstruieren zu können, wurden entsprechende Markierungen der Oberseite wie auch der Grenze Substrat/Atmosphäre an der Wurzel angebracht, und die Entfernung der Entnahmestelle zum Stamm notiert.

Im Labor werden die Wurzelproben vermessen und Skizzen der einzelnen Wurzelstücke angefertigt (Abbildung 14). Diese Skizzen dienen der genauen Darstellung der Position der zu entnehmenden Scheiben unter Berücksichtigung der drei zuvor beschriebenen Sektionen.

Eine Beprobung der Wurzelstücke in regelmäßigen Abständen (10, 15 oder 20cm je nach Länge der Probe) wie sie zur Analyse der Jahrringausprägung über die gesamte Wurzellänge durchgeführt wird (FAYLE 1968, KNY 1908, KRAUSE & ECKSTEIN 1993), wurde zu Beginn der Arbeit probeweise durchgeführt. Allerdings hat es sich im Hinblick auf die Bestimmung der Freilegungsmerkmale als nicht sinnvoll erwiesen. Die Auswahl der Scheiben muß sich an der Lage innerhalb der drei angesprochenen Sektionen orientieren um die entsprechenden Strukturen auszuweisen.

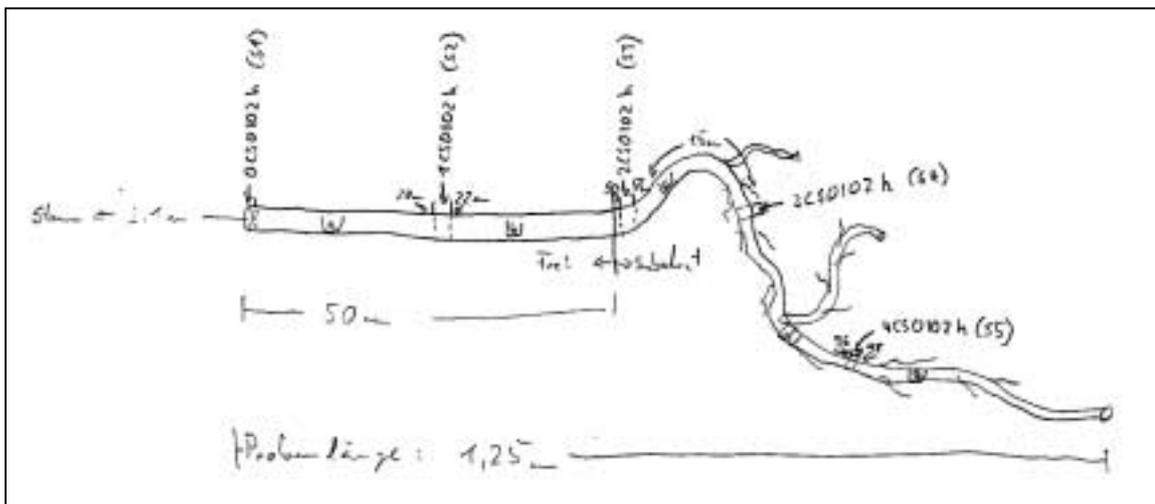


Abb. 14: Handskizze (Aufsicht) einer vermessenen Wurzelprobe sowie die Markierung der Position der zu entnehmenden Scheiben.

### 4.3 Codierung und Präparation der Proben

Eine eindeutige Kennzeichnung der im Gelände gewonnenen Wurzelproben ist für die weitere Aufbereitung und Analyse des Materials unerlässlich. Eine einfache Beschriftung eines entnommenen Wurzelstückes bezüglich des Entnahmestandortes im Gelände erscheint bei einer geringen Probenzahl noch klar und sinnvoll.

Für die weitere Bearbeitung der Proben im Labor erweist sich diese schnell als ungeeignet, da (i) es bei einer steigenden Probenzahl leicht zu Verwechslungen kommen kann und (ii) die Entnahme mehrerer Scheiben aus einer Wurzelprobe eine ständige Erweiterung der Beschreibung erfordern würde.

Aus diesem Grund wurde für die Beschriftung und Zuordnung der Proben die auf dem Jahrring-Meßprogramm TSAP beruhende Syntax einer eindeutigen acht-stelligen Codierung von Stammproben des Jahrringlabors in Bonn (siehe Tabelle 3) übernommen

und an die Erfordernisse der Codierung der Wurzelscheiben angepaßt. Im Rahmen der Syntax dienen die ersten sieben Stellen der eindeutigen Identifikation eines Baumes, während die achte die dazugehörige (Stamm-)Probe bezeichnet.

Tabelle 3: Darstellung der acht-stelligen Probencodierung für Stammproben

Code : <u>1</u> <u>2</u> <u>3</u> <u>4</u> <u>5</u> <u>6</u> <u>7</u> <u>8</u>		
Codestelle	Bedeutung	Beispiel
<b>1</b> (Buchstabe)	Bearbeiter	<b>H</b> (= Holger)
<b>2</b> (Buchstabe)	Land	<b>C</b> (= Schweiz; D = Deutschland)
<b>3</b> (Buchstabe)	Lokalität	<b>R</b> (= Ritigrabe)
<b>4 + 5</b> (Ziffern)	Standortnummer	<b>0 1, 0 2, ...</b>
<b>6 + 7</b> (Ziffern)	Baumnummer	<b>0 1, 0 2, ...</b>
<b>8</b> (Buchstabe)	Probe	<b>a, b, c, d</b> (= Bohrrichtung (Bohrkern)) <b>z</b> (= Nur eine Probe am Baum (Bohrkern)) <b>u, o</b> (= Probe unten / oben (Bohrkern)) <b>s</b> (= Stammscheibe)

Für die Zuordnung mehrerer Wurzelproben zu einem Baum werden für die achte Stelle die Buchstaben **e – l** eingeführt. Dies ermöglicht die eindeutige Zuordnung von bis zu 8 entnommenen Wurzeln zu einem Baum. Eine Erweiterung des acht-stelligen Codes um eine Stelle für die Zuordnung mehrerer Scheiben zu einer Wurzelprobe wäre die einfachste Lösung für eine mögliche Codierung der Wurzelscheiben. Davon wird in dieser Arbeit abgesehen, da alle Proben mit TSAP bearbeitet werden und dieses Programm nur eine acht-stellige Bezeichnung der gespeicherten Daten erlaubt. Aus diesem Grund wird ein Kompromiß eingegangen:

Der Buchstabe der Codestelle 1 wird durch eine Ziffer (**0 – 9**) ersetzt, um die eindeutige Zuordnung von bis zu 10 Wurzelscheiben zu einer Wurzel zu erlauben. Beispielsweise werden aus der Wurzelprobe H C R 0 1 0 1 e zwei Scheiben entnommen. Diese zeigen dann folgende Codierung: **0 C R 0 1 0 1 e** und **1 C R 0 1 0 1 e**

Nach der Festlegung der Lage der gewünschten Querschnitte werden an den entsprechend markierten Stellen ca. 2cm starke Scheiben aus der Probe entnommen. Diese werden der jeweiligen Codierung beschriftet und mit einer Markierung für die der gesamten Probe entsprechenden Oberseite der Probe versehen, um bei späteren Auswertungen eine korrekte Orientierung aller entnommenen Scheiben zu gewährleisten.

Im weiteren Verlauf der Auswertungen hat es sich als sinnvoll erwiesen, für einen gewünschten Querschnitt zwei Scheiben anzufertigen, da eine Scheibe bei der späteren Dünnschnittpräparation (Kapitel 4.3.1) zerstört wird und somit nicht mehr für etwaige weitere makroskopische Kontrollen verfügbar ist.

Zwei gleichartige (wenn auch spiegelbildliche) Querschnitte einer bestimmten Stelle der Wurzel erhält man, wenn man an beiden Seiten der gewünschten Querschnittfläche eine

entsprechende Scheibe schneidet und die aneinandergrenzenden Querschnittflächen dieser Scheiben zur Auswertung verwendet. Die geringen Differenzen, die sich durch den Materialverlust (ca. 2mm pro Querschnittfläche) beim sägen und späteren schleifen der Flächen ergeben, sind nach eigenen Erfahrungen vernachlässigbar gering. Auch ist es ausreichend, die zusammengehörigen Scheiben mit der gleichen Codierung zu versehen, da sie den gleichen Querschnitt repräsentieren. Um eine Einheitlichkeit der Auswertung zu gewährleisten, wurde jeweils die Scheibe in Stammrichtung zur Dünnschnittpräparation, die Scheibe auf der Seite der Wurzelspitze für die makroskopische Auswertung verwendet. Eine einfache Zusatzmarkierung auf der Rückseite der Scheiben reicht zur Unterscheidung aus.

Nach der Scheibenentnahme werden die Querschnittflächen mit zunehmend feiner werdender Körnung geschliffen. Während für die Scheiben der späteren Dünnschnittpräparation eine 250er Körnung ausreichend ist, sollten die Gegenstücke für die makroskopische Auswertung mit einer 600er Körnung feingeschliffen werden, um eine detaillierte Vorauswertung durchzuführen.

#### **4.3.1 Präparation der Dünnschnitte**

Die Auswertung der fein geschliffenen Wurzelscheiben unter dem Binokular (maximale Vergrößerung 40-fach) ermöglicht neben der zuvor erläuterten Jahrringanalyse einen ersten Eindruck über Veränderungen der Zellstruktur. Um aber Veränderungen einzelner Zellreihen, bzw. einzelner Zellen detailliert erfassen zu können ist es einerseits erforderlich eine wesentlich höhere Vergrößerung zu verwenden, andererseits sind die Zellwandstrukturen durch die Zellinhaltsstoffe nicht sehr deutlich zu erkennen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, Präparate anzufertigen die unter einem Durchlichtmikroskop unter einer höheren Vergrößerung analysiert werden und die zudem nur die Zellwandstrukturen zeigen, d.h. keine störenden Zellinhaltsstoffe mehr enthalten.

Die Vorgehensweise bei der Präparation der Dünnschnitte ist in verschiedenen Publikationen beschrieben (BERLYN & MIKSCH 1976, CUTLER 1978, ROBARDS 1985, SCHWEINGRUBER 1978, 1990, 2001), oft aber auch nur am Rande erwähnt (u.a. CUTLER et al. 1987; GASSON & CUTLER 1990, DE MATTOS et al. 1999). Darüber hinaus variiert die Art der Präparation in Abhängigkeit des zu untersuchenden Materials (u.a. KUTSCHERA & SOBOTIK 1992). Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit macht es zudem erforderlich Dünnschnitte anzufertigen, die in radialer Richtung eine möglichst lange Jahrringabfolge umfassen, um auch kontinuierliche Veränderungen erkennen zu können. Aus diesem Grund erscheint es hier sinnvoll, detailliert auf die Art der Dünnschnittpräparation einzugehen.

Grundlage zur Auswahl der zu analysierenden Bereiche ist die makroskopische Auswertung der geschliffenen Scheiben. Hierbei werden unter dem Binokular Jahrringe ausgewählt, die eine Veränderung der Zellstruktur andeuten. Diese Bereiche werden auf der Wurzelscheibe markiert. Um diese Markierungen wird ein Rechteck mit einer maximalen Breite von 1cm gezeichnet. Die Länge dieses Rechtecks (in radialer Richtung) ist einerseits abhängig von der Anzahl der Jahrringe, die man mit dem Präparat abdecken will, andererseits durch die Größe der Einspannvorrichtung des Schneidegerätes (Schlittenmikrotom, s.u.) auf ca. 7cm begrenzt. Im Laufe der weiteren Auswertungen hat sich gezeigt, daß für konkrete Auswertungen der Zentralzylinder der Wurzel Teil des Präparates sein sollte.

Nach der Festlegung der zu analysierenden Bereiche wird mit einem Messer oder einem kleinen Beil entsprechend der Markierung ein Block aus der Wurzelscheibe herausgetrennt (Abbildung 15). Dieses Abspalten ist einerseits schneller als den Block aus der Scheibe auszusägen, andererseits wird der gewünschte Block entsprechend der Faserrichtung aus der Scheibe getrennt. Dies ermöglicht eine genauere Positionierung der Probe im Schlittenmikrotom um einen präzisen Querschnitt zu erhalten (SCHWEINGRUBER 2001).

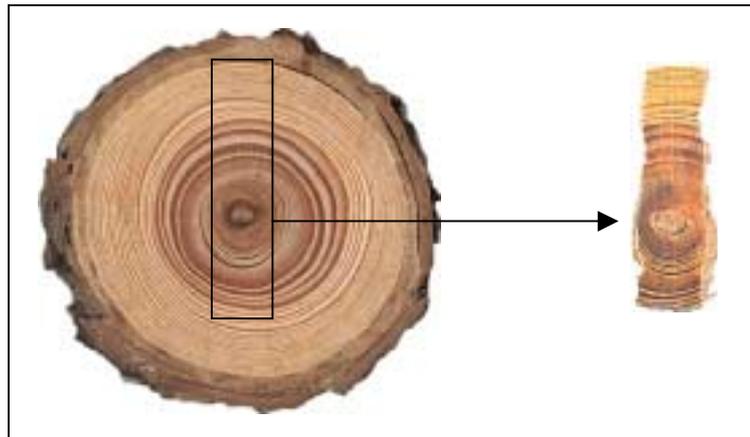


Abb. 15: Abtrennung des markierten Bereiches aus der Wurzelscheibe

Die auf diese Weise entstandenen Blöcke werden vor dem schneiden in Wasser eingelegt, um das zumeist trockene Holz für den Schnitt etwas weicher zu machen. Bei Koniferenwurzeln, die starkes Druckholz zeigen empfiehlt es sich, die Proben vor dem schneiden einige Minuten zu kochen.

Unter Verwendung eines Schlittenmikrotoms werden dann die Dünnschnitte (Stärke der Schnitte ca.  $15\mu$ ) angefertigt. Dabei sollte man darauf achten daß das verwendete Messer keine „Scharten“ aufweist und daß es bei der teilweise ungewöhnlichen Größe der gewünschten Querschnitte (max.  $7 \times 1\text{cm}$ ) in einem sehr spitzen Winkel zum

Präparat geführt wird, um ein Zerdrücken und Ausreißen der Zellwände zu vermeiden (Abbildung 16).

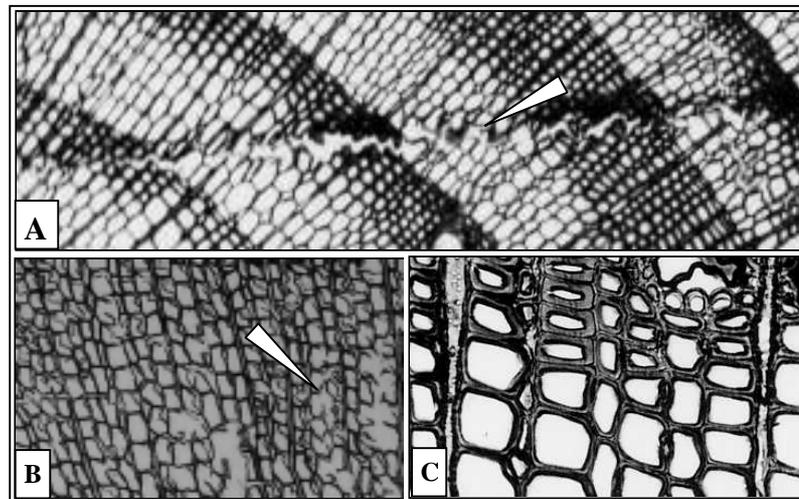


Abb. 16: Darstellung verschiedener Dünnschnittergebnisse. **A:** Spur einer „Scharte“ des Messers (Pfeil) im Dünnschnitt. **B:** Zerdrückte und ausgerissene Zellwände (Pfeil) durch einen ungünstigen Anstellwinkel des Messers. **C:** Gelungener Schnitt bei optimaler Einstellung.

Um die Zellstruktur deutlich sichtbar zu machen, müssen zunächst die Zellinhaltsstoffe aus dem Präparat herausgelöst werden. Hierzu wird das auf einem Objektträger liegende Schnittpräparat in Javel-Wasser ( $\text{NaOCl}$ ) eingelegt. Nach ca. 5 bis maximal 10 Minuten werden dann die gelösten Zellinhaltsstoffe mit Wasser ausgespült. Anschließend werden die verbliebenen Zellstrukturen des Präparates mit 1% wässriger Safranin-Lösung eingefärbt. Nach ca. 3 – 5 Minuten wird das Präparat dann mit einer Alkohol-Reihe (75% - 95% - absolut) gespült, um die überschüssige Safranin-Lösung zu entfernen und das Präparat zu entwässern. Anschließend wird der gefärbte, dehydrierte Dünnschnitt kurz mit Xylol gespült. Treten dann noch Trübungen auf, muß noch einmal mit Alkohol gespült werden. Der präparierte Dünnschnitt wird dann direkt unter einem dünnen Glasblättchen in Canada-Balsam (Harz) eingebettet, mit einem Gewicht (ca. 50g) beschwert und zum Aushärten für ca. 24 Stunden bei  $60^{\circ}\text{C}$  in einen Trockenschrank gegeben (SCHWEINGRUBER 1978).

Die auf diese Weise präparierten Dünnschnitte werden dann zur genaueren Analyse der Zellstrukturen unter einem Mikroskop betrachtet und zur Präsentation verschiedener Strukturen in unterschiedlichen Vergrößerungen photographiert (siehe Anhang 3). Um einen besseren Kontrast zu erreichen verwendet man hierfür schwarz-weiß Filme.

Der gesamte Vorgang von der Geländeerhebung bis zu den fertigen Dünnschnittpräparaten wird in Abbildung 17 zusammenfassend dargestellt.

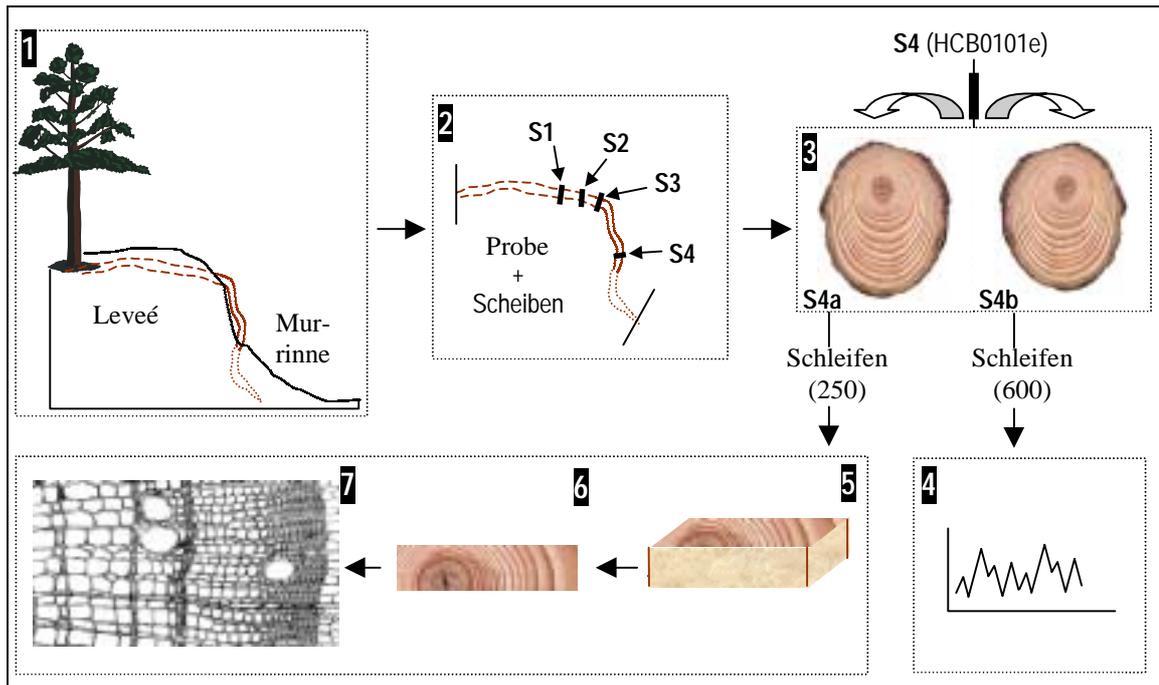


Abb. 17: Ablauf der Datenerhebung, Probennahme und Präparation zur Analyse freigelegter Wurzeln. 1: Geländeerhebung. 2: Probennahme und Auswahl der Querschnitte. 3: Präparation gegenüberliegender Querschnitte. 4: Makroskopische Auswertung (u.a. Jahringbreite, Alter). 5: Ausspalten markierter Blöcke. 6: Anfertigen der Dünnschnitte. 7: Auswertung der Merkmale unter dem Mikroskop und Präsentation durch Photographien. (Verändert nach GÄRTNER et al. 2001:3)

#### 4.4 Auswertung

Die Auswertung der Proben beginnt zunächst mit einer makroskopischen Analyse der feingeschliffenen Querschnitte unter dem Binokular. Hierfür werden die Scheiben jeder Wurzel den drei Sektionen entsprechend ihrer Lage relativ zur Bodenoberfläche zugeordnet. Parallel dazu werden Scheiben nicht freigelegter Wurzeln der gleichen Baumart ausgewertet. Die jeweilige Tiefenlage dieser Proben unter der Bodenoberfläche wird dabei berücksichtigt.

Diese erste Auswertung orientiert sich an den Vorgaben zur Erstellung von Sekeltonplots, die einen ersten Einblick in das Auftreten markanter Zuwachsänderungen (Ereignisjahre, Weiserjahre) liefern (Schweingruber et al 1990, 1991)

Allerdings wurde hierbei nicht das eigentliche Skeletonplotverfahren der Markierung von Zuwachsänderungen durch Strichsignaturen auf Inch-Papier durchgeführt. Dieses Verfahren genau zu übernehmen erscheint hier nicht sinnvoll, da es nicht Ziel dieser Arbeit ist, gemeinsame Wachstumsreaktionen verschiedener Wurzeln der gleichen Baumart zu analysieren und zu synchronisieren. Dieses Verfahren wurde bereits mehrfach angewendet und die Möglichkeiten der Synchronisation mit dem Stammwachstum sind bekannt (u.a. YAMAGUCHI et al. 1997), auch wenn sie nur selten

angewandt wurden. In Grundzügen wurde dieses Verfahren zur Altersbestimmung genutzt, um die Datierung von Veränderungen der Zellstruktur abzusichern.

Die Altersbestimmung jeder Probe erfolgte über das Auszählen der Jahrringe beginnend beim äußeren Jahrring an vier Radien eines Querschnittes und anschließendes Messen der Jahrringbreite mit dem Jahrringmessprogramm TSAP. Auskeilende Jahrringe wurden markiert, die Messungen der Einzelradien synchronisiert und entsprechend korrigiert, um eine genaue Altersbestimmung des entsprechenden Querschnittes zu ermöglichen (Fritts 1976, Schweingruber 1983, 1996).

Um das Ziel der Erkennung spezieller Strukturveränderungen im Querschnitt einer Wurzel zu erreichen, wurde an Stelle der Skeletonplot Darstellung eine Tabelle entwickelt, die auf den bisher bekannten, allgemeinen Veränderungen der Zellstruktur (siehe Tabelle 1) beruht. In dieser Tabelle (Tabelle 4) werden spezielle, makroskopisch erkennbare Veränderungen im Jahrringbild aufgelistet. Die Auflistung erfolgt gemäß der Wurzelentwicklung vom ersten Jahrring nach Außen. Der Grad der Veränderung orientiert sich an den ersten Jahrringen der Wurzel, wobei hier nur deutlich erkennbare Veränderungen festgehalten werden, keine leichten Schwankungen.

Tabelle 4: Beispiel einer Tabelle zur Auflistung makroskopisch erkennbarer Veränderungen der Jahrringstruktur

Jahr	MERKMALE			Bemerkungen
	Jahrring	Frühholz	Spätholz	
1956				
1957				
1958			Ø 1 Zellreihe	Einheitliche Ausprägung
1959				
1960	▲	TH	▲ +	Spätholz stammähnlich
.....				
.....				
.....				
+ / - = Anstieg / Abnahme Zellanzahl			TH=traumatische Harzkanäle	
▲ / ▼ = Breitensteigerung / -reduktion Jahrring / Frühholz / Spätholz			V = Verletzung	
● / ○ = positive / negative Veränderung der Zellgröße (falls erkennbar)				

Die Auswertung dieser „Merkmalsplots“ bildet die Basis der Auswahl der Dünnschnittsektionen. Detaillierte Auswertungen verschiedener Strukturveränderungen werden unter Verwendung der Dünnschnittpräparate wie auch der gescannten Photographien der Zellstrukturen durchgeführt.

#### 4.4.1 Graustufenanalyse

Die äußeren Jahrringe freigelegter Wurzelteile erscheinen im Allgemeinen stammähnlicher. Das heißt, die Früh- und Spätholzstrukturen wie auch die Jahrringgrenzen sind deutlicher ausgeprägt. Dies vermittelt im Jahrringbild einen optisch dichteren Eindruck, die Jahrringe erscheinen dunkler als die nicht freigelegter Wurzeln. Diese dunklere Erscheinung ist größtenteils durch einen starken Anstieg der Anzahl der Späholzzellen bedingt. Vereinzelt ist aber auch eine Reduktion der Zellgrößen im Frühholz erkennbar, wodurch der dunklere Eindruck weiter verstärkt wird. Dies ist die Grundlage für den Versuch eine Bestimmung der Helligkeitswerte der einzelnen Jahrringe durch eine Pixelanalyse der Graustufen in den gescannten Photographien.

Erste Versuche haben gezeigt, daß die einfache Auswertung und Darstellung der Graustufen (Grauwerte von 0 = schwarz bis 255 = weiß) der Pixel einzelner Bildausschnitte nur eine Häufigkeitsverteilung (Anzahl der Pixel der entsprechenden Grauwerte) zuläßt. Diese hängt zudem von der Größe des Ausschnittes ab (siehe Anhang 4). Der Vergleich der Helligkeitswerte einzelner Jahrringe erfordert die Bestimmung eines Mittelwertes, der unabhängig von der Ausschnittsgröße ist, da diese entsprechend der Jahrringbreite variiert. Dazu wird statt des Mittelwertes der reinen Häufigkeitsverteilung der Graustufen eines Ausschnittes folgender Quotient berechnet:

$$G_m = S_g / S_n \quad \text{wobei} \quad S_g = \sum_{(0-255)} G * AP$$

$G_m$  = Mittlerer Grauwert des Jahrringausschnittes;  $S_g$  = Gewichtete Summe der Pixel des Ausschnittes;  $S_n$  = ungewichtete Summe der Pixel;  $G$  = Graustufe (0-255);  $AP$  = Anzahl der Pixel der entsprechenden Graustufe

Der Zähler  $S_g$  beschreibt eine mit dem Graustufenwert gewichtete Summe der Pixel. Diese wird durch die Division mit der ungewichteten Pixelsumme (Nenner) normiert. Der resultierende Quotient des Jahrringausschnittes ist so unabhängig von der Größe des Ausschnittes.

#### 4.4.2 Zellgrößenmessungen

Um Veränderungen der Zellgrößen zu erfassen wurden die Ausmaße der Zellen in radialer (im folgenden Zelllänge) und tangentialer (im folgenden Zellbreite) Richtung am Dünnschnittpräparat gemessen. Der hier verwendete Begriff der Zelllänge darf nicht mit den üblichen Angaben der eigentlichen Zelllänge (in vertikaler Richtung) verwechselt werden (siehe Kapitel 2.4.1.5). Da in dieser Arbeit ausschließlich Querschnitte verwendet werden erscheint der Begriff Zelllänge für die radiale Ausdehnung der Zelle am geeignetsten.

Um einen repräsentativen Wert für Veränderungen der Zellgröße zu erhalten, wurde die jeweilige Größe der Zellfläche (Länge \* Breite) verwendet.

Das Erkennen von Zellgrößenveränderungen von Jahrring zu Jahrring erfordert wiederum die Bestimmung einer mittleren Zellgröße des entsprechenden Jahres. Hierzu wurden pro Jahrring je 20 Zellen vermessen und die Werte entsprechend gemittelt. Die Zellgrößenmessungen konzentrieren sich dabei aus zwei Gründen auf die Frühholzzellen:

- 1) Die Größe der Spätholzzellen in radialer Richtung ist zu gering, um entsprechend der Meßgenauigkeit der Jahrringmeßanlage (1/100mm) deutliche Unterschiede zu erfassen
- 2) Die Spätholzzellen zeigen keine deutlichen Größenveränderungen, sondern deutliche Veränderungen der Zellwandstärke. Diese kann rein optisch erfaßt werden und erfordert zunächst keine direkte Messung.

#### **4.4.3 Zellanzahl**

Zunächst wird für jeden Jahrring eines Querschnittes die Anzahl der Frühholz- und der Spätholzzellen durch Auszählen am Dünnschnitt unter dem Binokular bestimmt. Diese Werte werden den jeweiligen Frühholz-, Spätholz- und Jahrringbreitenmessungen gegenübergestellt. Ein Problem stellt dabei die oft undeutliche Grenze zwischen Frühholz- und Spätholzzellen dar. Um einen repräsentativen Wert zu erhalten, werden die eindeutig zuzuordnenden Zellen entlang mehrerer radialer Zellreihen (min. 10) gezählt und der entsprechende Mittelwert der Anzahl als endgültiger Wert verwendet. Die Auswertung der Daten erlaubt genaue Aussagen über den Anteil der Früh- und / oder Spätholzzellen am häufig beobachteten Anstieg der Jahrringbreite (u.a. FAYLE 1968) freigelegter Wurzeln.

#### **4.4.4 Saugversuche**

Zur grundlegenden Analyse eines möglichen Funktionswechsels der Wurzel im Zuge sich verändernder Umgebungsbedingungen wurden einige freigelegte und nicht freigelegte Wurzeln aus verschiedenen Bodentiefen einem Saugversuch unterzogen. Hierfür wird das stammseitige Ende der Wurzel mit einem Schlauch an einem Unterdruckgenerator angeschlossen. die Gegenseite wird in eine wäßrige Safranin- oder Cobaltblau-Lösung getaucht. Dann wird ein Unterdruck von ca. 1bar erzeugt, wodurch das Färbemittel angesogen wird. Besitzen die Zellen nach wie vor eine Transportfunktion, bewirkt die Lösung eine Einfärbung der entsprechenden Zellen. Zellen, die diese Funktion nicht mehr besitzen, bleiben unverändert.

## 5 Ergebnisse

In den bisherigen Ausführungen wurde vermehrt darauf hingewiesen, daß die wenigsten Publikationen Hinweise auf die Art der Freilegung geben, oft ist nicht einmal die genaue Orientierung der analysierten Proben erwähnt (FAYLE 1968). Selbst wenn diese Informationen gegeben sind, konnte keine genaue Merkmalszuordnung durchgeführt werden. Dies liegt darin begründet, daß bisher der freilegende Prozeß hinsichtlich seiner Eigenschaften nie berücksichtigt wurde und es bis dato keine eindeutige Beschreibung einer „normalen“ Wurzelstruktur gibt, über deren Vergleich die Bestimmung „diagnostischer“ Merkmale der Freilegung möglich ist.

Der methodische Ansatz der vorliegenden Arbeit basiert, wie in der Einführung erläutert, auf einer Kombination geomorphologischer, holzanatomischer wie auch dendrochronologischer Konzepte. Die Berücksichtigung der genauen Lage einer Wurzel relativ zur Oberfläche im Rahmen dieser Arbeit erlaubt eine detaillierte Erfassung unterschiedlicher Wachstumsreaktionen. Dies gilt ebenso für nicht freigelegte Wurzeln der gleichen Baumart in unterschiedlicher Tiefenlage. Auch hier konnten Unterschiede in der Zellstruktur aufgezeigt werden. Deshalb erscheint es sinnvoll, die Präsentation der Ergebnisse mit den gewonnenen Erkenntnissen über die „normale“ Wurzelstruktur einzuführen (Kapitel 5.1).

Darauf aufbauend werden die durch eine Freilegung auftretenden Veränderungen der Jahrringausprägung wie auch der Strukturen von Früh- und Spätholzzellen aufgezeigt (Kapitel 5.2). Hierbei spielt die Berücksichtigung der Art der Freilegung, die Zuordnung der Probe zu einem der drei Sektoren der Gesamtprobe (freigelegt / Übergangsbereich / nicht freigelegt) und der Vergleich mit den nicht freigelegten Wurzelproben eine entscheidende Rolle. Gleiches gilt für die Art der angewandten Methoden, die zur Bestimmung diagnostischer Merkmale der Freilegung führten. Die zusammenfassende Darstellung dieser Merkmale (Kapitel 5.3) leitet über zur Diskussion der relevanten Einflußfaktoren (Kapitel 5.4) wie auch möglicher Funktionswechsel (Kapitel 5.5), die zur Erklärung der veränderten Strukturen herangezogen werden. Darüber hinaus werden daraus resultierende Möglichkeiten der Rekonstruktion von Abtragsraten (Kapitel 5.6.1) und konkrete Anwendungsbeispiele (Kapitel 5.6.2) präsentiert.

### 5.1 Strukturen nicht freigelegter Wurzeln

Die Auswertung der Dünnschnitte nicht freigelegter Wurzeln von *Larix decidua*, *Picea abies* und *Pinus cembra* aus unterschiedlichen Bodentiefen der jeweiligen Standorte zeigt deutliche Unterschiede in der Ausprägung der Jahrringstruktur. Abbildung 18 zeigt die Jahrringstruktur einer Wurzelprobe (*Larix decidua*), die in 17cm Tiefe

(Murrinne Ritigrabe) entnommen wurde im Vergleich zur Jahrringstruktur einer *Larix decidua* Stammprobe.

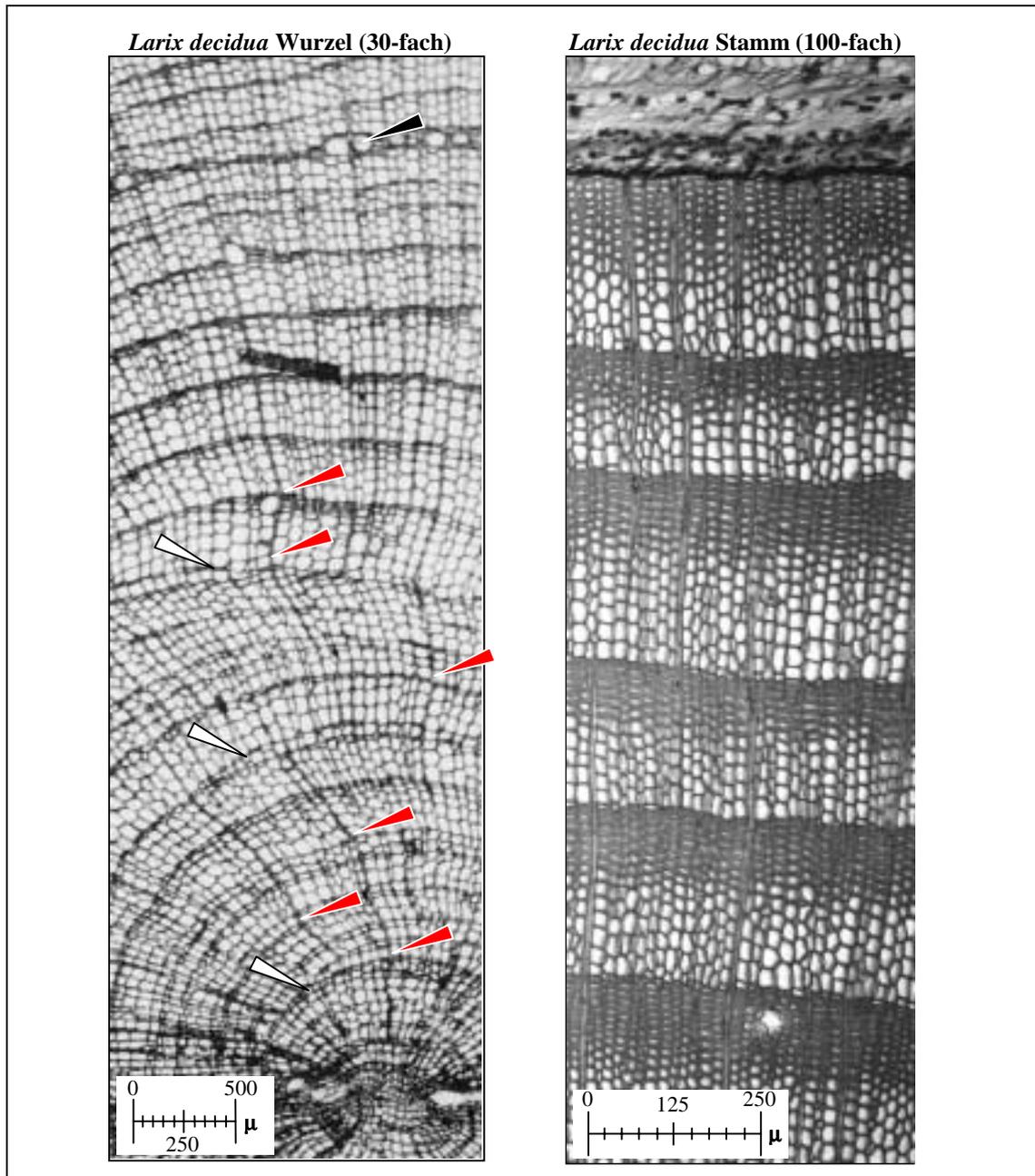
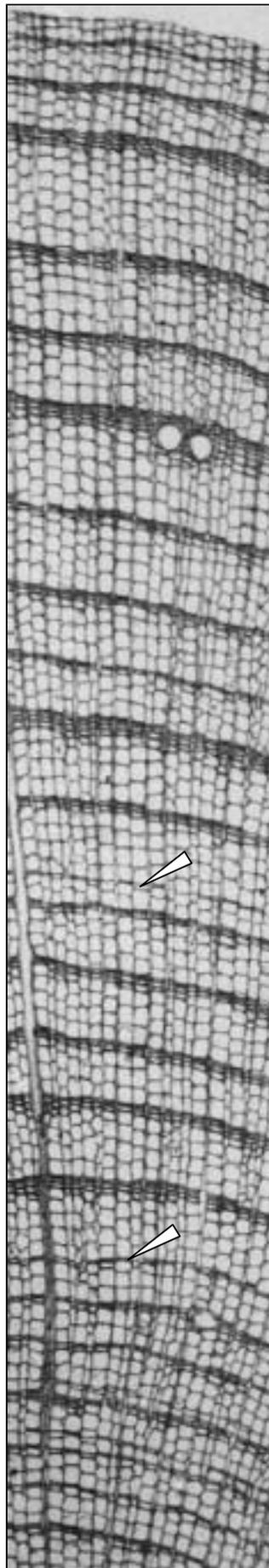


Abb. 18: Jahrringe einer *Larix decidua* Wurzel (A) (Probe in 17cm Tiefe entnommen) im Vergleich zu Jahrringen eines *Larix decidua* Stammes (B). Zu beachten ist die unterschiedliche Skalierung der Photos. Die Markierungen in Bild A kennzeichnen auskeilende Jahrringe (weiße Pfeile), sowie Verbiegungen der Markstrahlen (rote Pfeile) und traumatische Harzkanalreihen (schwarzer Pfeil), die auf mechanische Beanspruchungen schließen lassen.

Auffallend ist in Abbildung 18 neben der Größe der Zellen vor allem die unterschiedliche Ausprägung der Spätholzzellen der Wurzel im Vergleich zum Stamm. Die Spätholzzellen einer *Larix decidua* Wurzel dieser Tiefenlage zeigen ein deutlich

*Larix decidua* Wurzel (30-fach)



größeres Zellvolumen, die Zellwände erscheinen weniger verdickt. Die Jahrringgrenze wird häufig nur von einer Spätholz- (SH) Zellreihe gebildet. Die Zellwände der Frühholz- (FH) Zellen sind ebenfalls weniger stark ausgeprägt als die des Stammes. Darüber hinaus erscheint die Ausprägung und Anordnung der FH-Zellen der des Stammes sehr ähnlich. Eine Ausnahme stellen die offensichtlich durch mechanische Beanspruchung betroffenen Bereiche (rote Pfeile in Abb. 18 A) dar, die gesondert in Kapitel 5.5 besprochen werden.

Ein anderes Bild bietet sich bei der Betrachtung der Wurzelstruktur in Abbildung 19. Diese Probe wurde in einer Tiefe von 14cm (Murrinne Ritigrabe) entnommen. Betrachtet man die SH-Zellen näher, stellt man fest, daß diese bezüglich ihrer Anzahl wie auch ihrer Zellwandstärke deutlicher ausgeprägt erscheinen. Allerdings ist dies nicht durchgehend der Fall. Vor allem in Richtung des Wurzelzentrums ist dieser Unterschied nicht mehr ausgeprägt (weiße Pfeile als Beispiel). Die FH-Zellen zeigen das gleiche Bild wie die in Abbildung E1 A. Lediglich die Anzahl der FH-Zellen ist in den Jahren mit deutlicher ausgeprägtem Spätholz höher.

Gleiche Ausprägungen sind auch bei Wurzeln von *Picea abies* in entsprechenden Tiefen zu finden. Verringert man die Auswahl der Tiefenlage der zu untersuchenden Wurzeln, werden die für Abbildung E2 beschriebenen Ausprägungen immer deutlicher.

Abb. 19: Dünnschnittaufnahme einer *Larix decidua* Wurzel, Entnahmetiefe 14cm. Auffallend sind die vor allem im Außenbereich deutlicher ausgeprägten Spätholzzellen. Richtung Zentrum ist diese Ausprägung weniger deutlich (weiße Pfeile).

0 500  
|+++++| μ  
250

Wurzeln von *Picea abies* und *Larix decidua* weisen vergleichbare Zellstrukturen in Abhängigkeit der Tiefenlage auf. In Abbildung 20 ist das Dünnschnittpräparat einer *Picea abies* Wurzelprobe aus 9cm Tiefe (Murkegel Große Grabe, St. Niklaus) dargestellt. Zum Vergleich wird auf Abbildung 24 verwiesen, welche die Zellausprägung einer *Larix decidua* Wurzel aus 10 cm Tiefe in Ausschnitten der inneren und äußeren Wurzelbereiche zeigt.

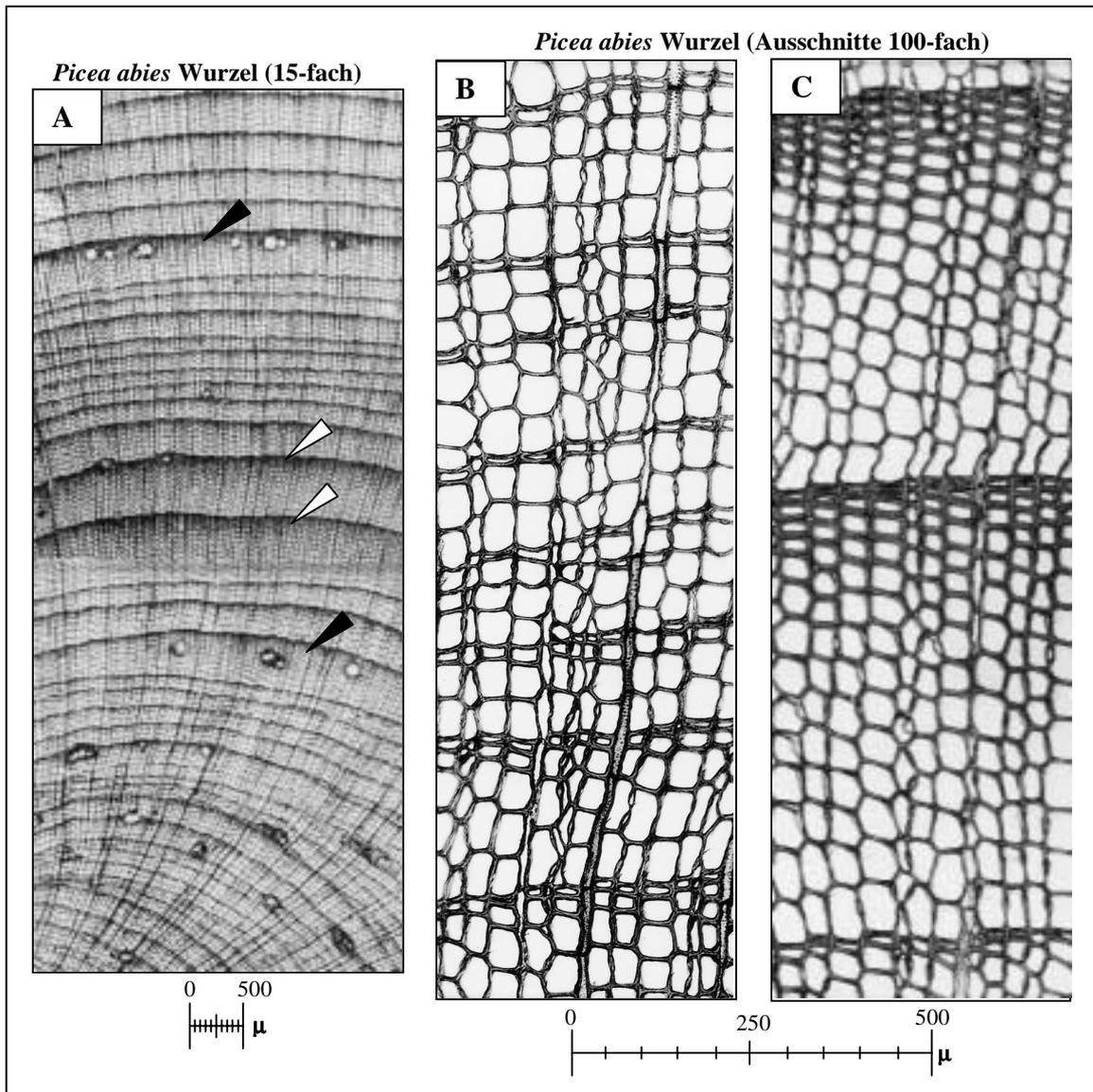


Abb. 20: Dünnschnitt *Picea abies* Wurzel, Probentiefe 9cm. **A:** Zusammengesetzte Photos zur Darstellung der Jahringausprägung. Vor allem im äußeren Bereich ist das Spätholz, der Übergang Frühholz – Spätholz wie auch die Jahringgrenze deutlich ausgeprägt. Die Pfeile weisen auf Zuwachssteigerungen durch mechanische Belastung hin (siehe Text). **B:** Vergrößerter Ausschnitt der inneren Jahrringe. Die Jahringgrenzen werden durch undeutlich ausgebildete Spätholzzellen gebildet. **C:** Vergrößerter Ausschnitt der äußeren Jahrringe. Das Spätholz ist deutlich ausgeprägt, die Anzahl der Frühholzzellen deutlich höher als im inneren Bereich.

Die Gesamtdarstellung der Jahrringabfolge in Abbildung 20 (Ausschnitt **A**, Wurzeloberseite) läßt eine nach außen zunehmend deutliche Jahrringausprägung erkennen. Zudem zeigen sich einige Schwankungen in der Spätholzbreite, die jeweils an eine Zunahme der Frühholzbreite gekoppelt scheint (weiße Pfeile in **A**). Diese Zuwachssteigerungen sind geprägt durch eine Verdickung der Zellwände im Frühholz. Die charakteristische Abflachung der Zellen als Übergang zum Spätholz tritt erst sehr spät auf. Somit sind nur die äußeren 3 – 4 Zellreihen als begrenzendes Spätholz anzusehen. Es handelt sich hier also um Reaktionen auf mechanische Belastungen, die sich in einer druckholzähnlichen Struktur widerspiegeln.

Ein weiteres Indiz hierfür sind vergleichbare Strukturausprägungen in Jahrringen mit traumatischen Harzkanälen (schwarze Pfeile). Ausschnitt **B** zeigt die Jahrringausprägung im Zentrum der Wurzel. Sie ist vergleichbar mit den Strukturen tiefer gelegener Wurzeln. Die Spätholzzellen sind weniger deutlich ausgeprägt, die Jahrringe werden häufig nur durch eine Zellreihe des Spätholzes begrenzt. Ausschnitt **C** dagegen zeigt eine deutliche Zunahme der Anzahl der Frühholz- wie auch der Spätholzzellen. Die Abgrenzung der Jahrringe ist durch die stärkere Ausbildung der Spätholzzellen (Zunahme der Zellwandstärke) wesentlich klarer zu erkennen.

Diese Unterschiede der Jahrringausprägung der inneren und äußeren Wurzelbereiche läßt den Schluß zu, daß die Wurzel sich im Laufe ihres Wachstums der Oberfläche genähert hat. Dies kann durch Oberflächenabtrag, aber auch durch eine Anhebung der Wurzel aufgrund der Zunahme ihres Durchmessers begründet sein. Bei diesem Beispiel handelt es sich um letzteres, da die Wurzel bei der Entnahme einem Block auflag, das überdeckende Material bestand aus steinigem, sandig schluffigem Material, wodurch ein Anheben der Wurzel während des Wachstums wahrscheinlich wird.

Ein weiteres Beispiel für den Einfluß der Bodentiefe zeigt eine in 5cm Tiefe entnommene *Larix decidua* Wurzel (Abbildung 21). Während die Struktur der ersten Jahrringe (Ausschnitt **A**) die Ausprägung einer tiefliegenden Wurzel zeigen (Ausprägung der Spätholzzellen, schwarze Pfeile in **A**), sind die äußeren Jahrringe (Ausschnitt **B**) durch eine sehr deutliche Spätholzbildung geprägt, wobei auch in diesem Beispiel druckholzähnliche Zellen zu erkennen sind (weißer Pfeil in **B**).

Bei diesem Beispiel ist von einer Annäherung an die Oberfläche durch Materialabtrag auszugehen, da die Wurzel in der Seitenwand einer Murrinne (Täschgufer) entnommen wurde. Die Tiefe der Wurzel im Verhältnis zur Oberfläche außerhalb der Rinne betrug 20cm, die vertikale Distanz zur Oberfläche der Seitenwand nur 5cm.

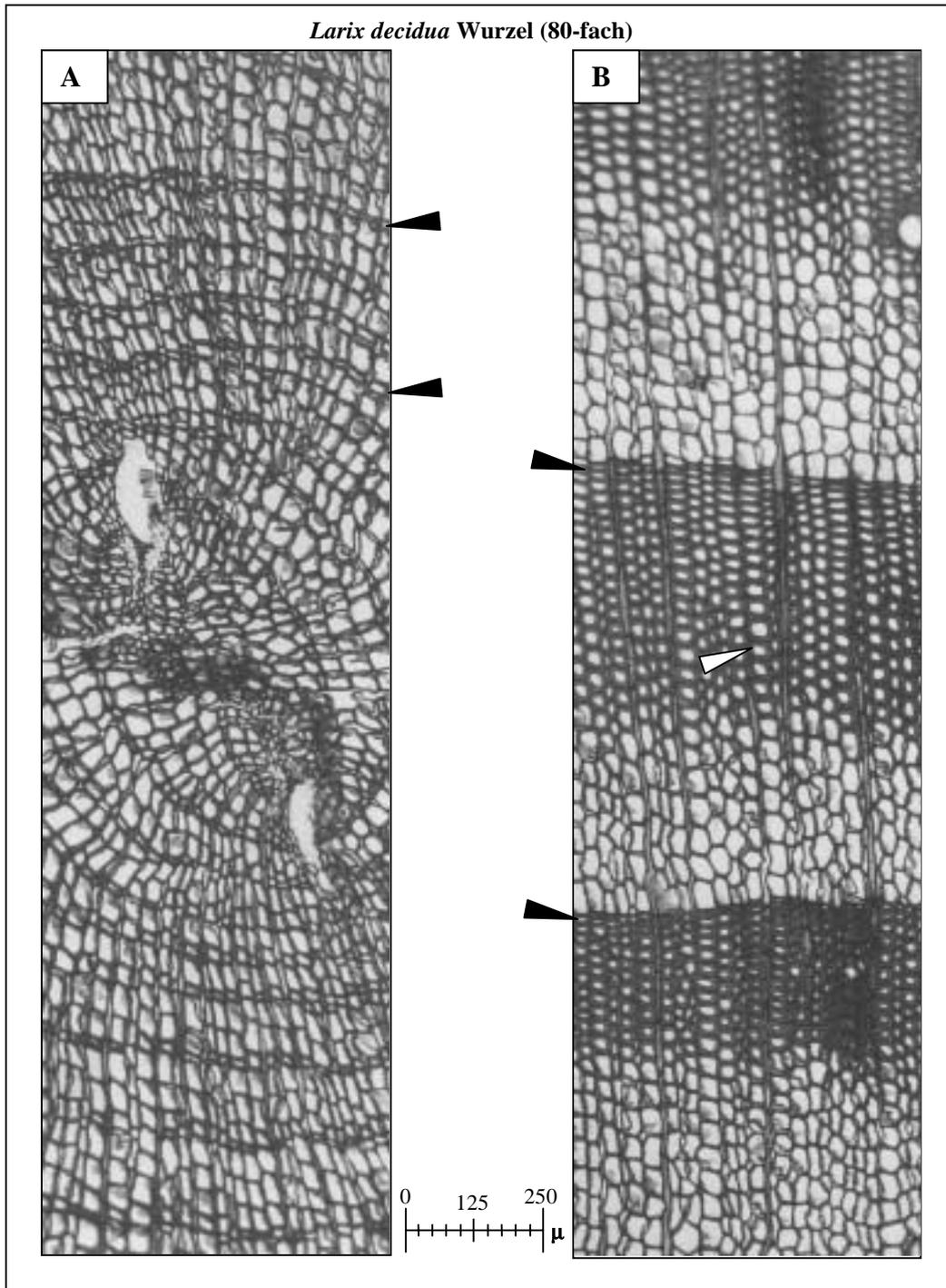


Abb 21: *Larix decidua* Wurzel, Entnahmetiefe 5cm. Dargestellt ist ein Vergleich der inneren (A) und äußeren (B) Jahrringe. Die unterschiedliche Ausprägung der Spätholzzellen (schwarze Pfeile in A und B) spiegelt unterschiedliches Wachstum in verschiedenen Tiefen wider. Erkennbar sind druckholzähnliche Strukturen in B (weißer Pfeil), rundliche, nicht abgeflachte Zellen mit stark ausgebildeten Zellwänden.

Ein etwas anderes Bild bietet sich bei der Auswertung von *Pinus cembra* Wurzeln aus verschiedenen Bodentiefen. Abbildung 22 zeigt 3 Ausschnitte aus 17cm, 10cm und 5cm Bodentiefe. Die für *Larix decidua* und *Picea abies* beschriebene Veränderung der Ausprägung der Spätholzzellen kann hier nicht in gleicher Art nachgewiesen werden. Die Probe aus 17cm Tiefe zeigt eine in gleicher Weise unregelmäßige Jahrringausprägung mit teilweise undeutlich erkennbaren Spätholzzellen. Die Probe aus 10cm Tiefe zeigt zwar ein regelmäßigeres Jahrringmuster, die Spätholzzellen sind aber nur wenig deutlicher zu erkennen. Eine Zunahme der Zellwandstärke und damit eine Verringerung des inneren Zelldurchmessers ist nur vereinzelt zu erkennen.

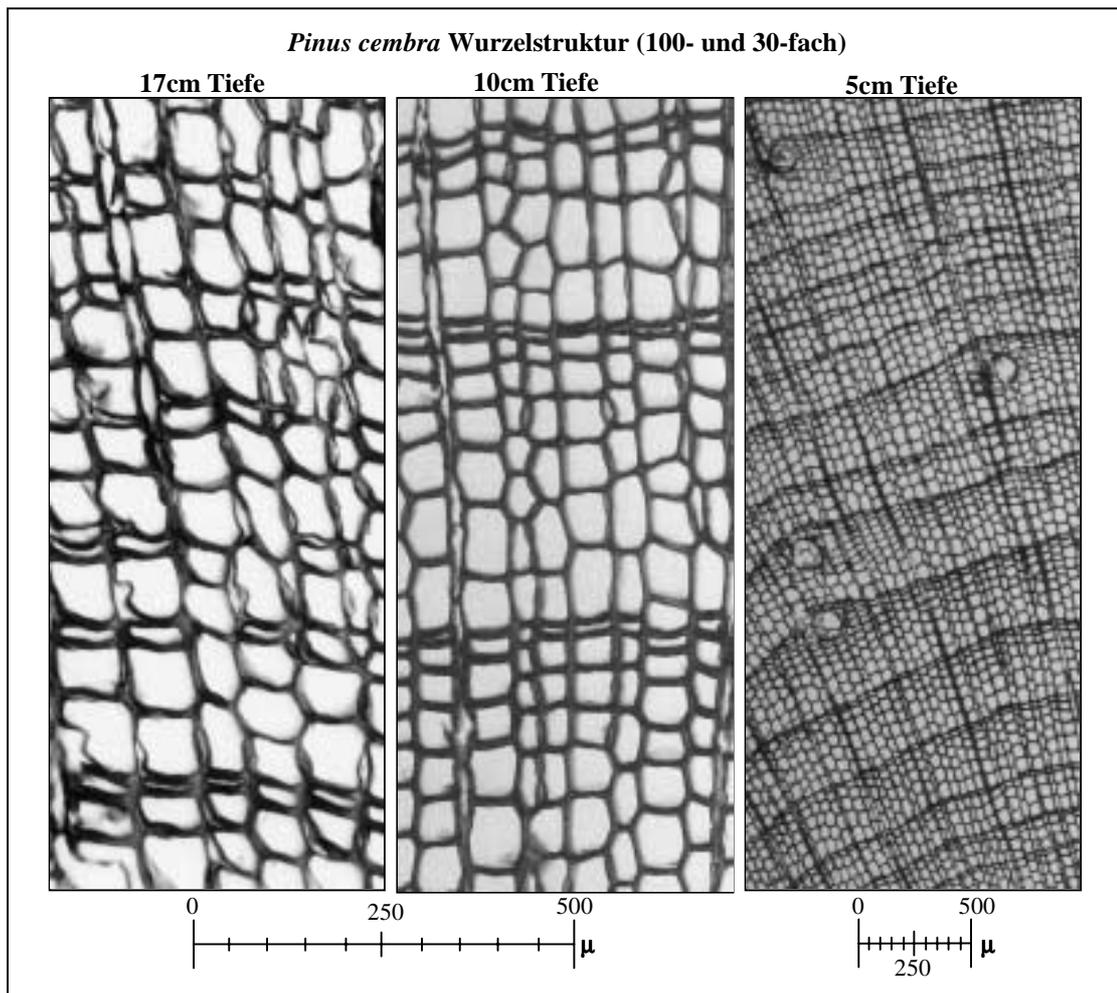


Abb. 22: Jahrringausprägungen dreier in unterschiedlicher Tiefe entnommener *Pinus cembra* Wurzeln. Die Probe aus 17cm Tiefe zeigt undeutliche Jahrringgrenzen durch eine minimale Ausprägung der Spätholzzellen. In 10cm Tiefe ist eine regelmäßiger Anordnung der Spätholzzellen und eine steigende Anzahl der Frühholzzellen erkennbar. Die Probe aus 5cm Tiefe zeigt eine etwas deutlichere Ausprägung der Spätholzzellen, die Zellanzahl bleibt jedoch begrenzt.

Lediglich die Anordnung wird regelmäßiger. Deutlich erkennbar ist dagegen die regelmäßiger Anordnung der Frühholzzellen wie auch der Anstieg der Zellreihen



Die Frühholzzellen zeigen, mit Ausnahme ihrer steigenden Anzahl in geringeren Bodentiefen keine offensichtlichen Veränderungen. Bei genauerer Betrachtung allerdings entsteht der Eindruck, daß es geringfügige Variationen in der FH-Zellgröße gibt. Diese Variationen scheinen vor allem in Verbindung mit mechanischen Belastungen aufzutreten (vergleiche Abbildung 21 B). Am Beispiel einer in 10cm Tiefe (Murkegel Wildibach) entnommenen 120-jährigen Wurzelprobe von *Larix decidua* (Abbildung 24) wird die Jahrringbreitenentwicklung (Abbildung 25), vor allem aber die entsprechenden Größenvariationen der Frühholzzellen aufgezeigt (Abbildung 26 und 27).

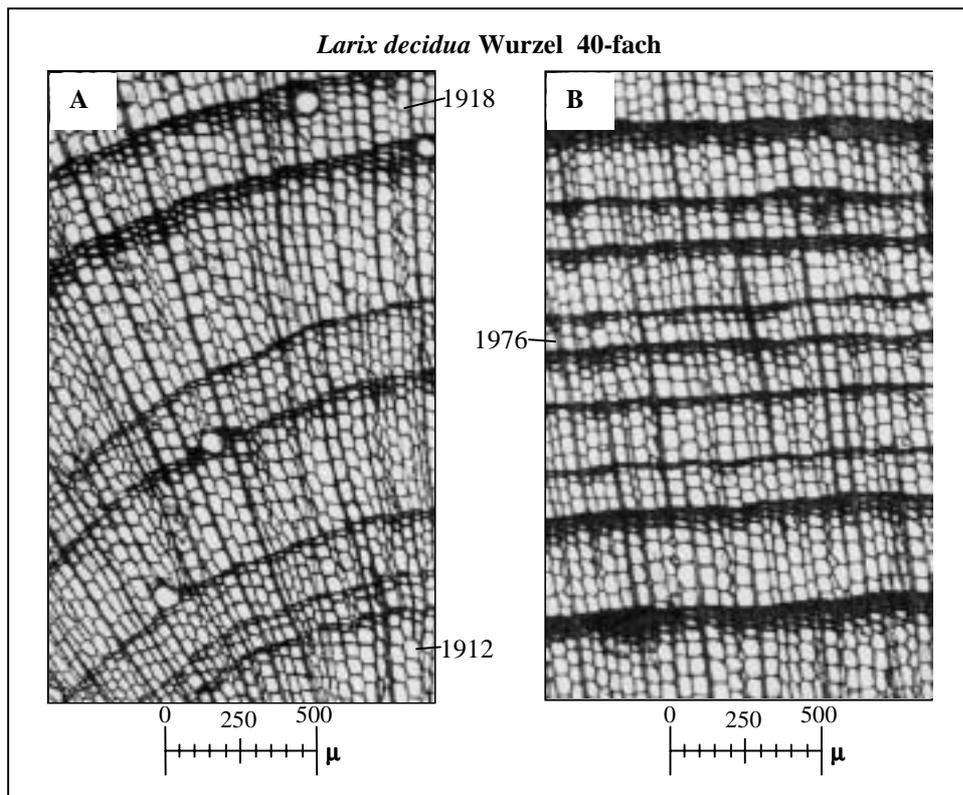


Abb. 24: Ausschnitte einer in 10cm Tiefe entnommenen, nicht freigelegten 120-jährigen *Larix decidua* Wurzel (HCW0102f). Ausschnitt **A** zeigt den Bereich der inneren Jahrringe nahe dem Zentrum, Ausschnitt **B** die Struktur der äußeren Jahrringe, die keine Unterschiede zu **A** aufzeigen.

Die Darstellung der FH-Zellen Werte erfolgt getrennt nach der Zelllänge (radiale Richtung im Querschnitt) und Zellbreite (Abbildung 26) wie auch der Zellflächenwerte (Abbildung 27). Die Zellfläche (Länge \* Breite der FH-Zellen) steht stellvertretend für die Zellgröße. Es ist zu erkennen, daß die Zellgröße deutlichen jährlichen Schwankungen unterliegt.

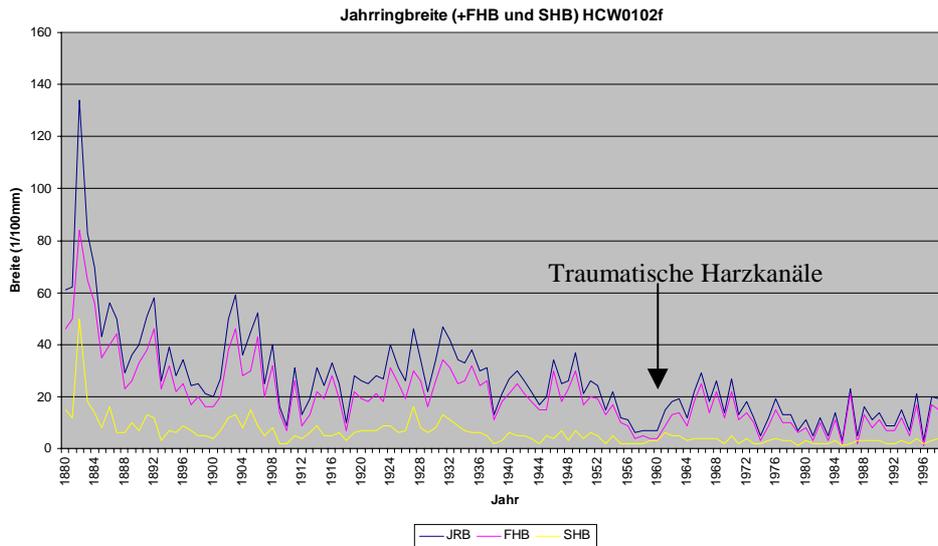


Abb 25: Diagramm der Jahrringbreite (JRB) gegen die entsprechende Frühholz- (FHB) und Spätholzbreite (SHB) der Wurzelprobe HCW0102f. Die einheitliche Reduktion der Breite zwischen 1957 und 1960 wird durch das Auftreten traumatischer Harzkanäle 1960 begrenzt (vergleiche Abb. E9 + 10).

Verfolgt man allerdings die Zellgrößenentwicklung über das gesamte Alter der Wurzel, wird ein abnehmender Trend erkennbar, der maßgeblich durch Veränderungen der Zelllängen gesteuert wird. Auffallend ist dabei der Zeitraum zwischen 1957 und 1960. Hier ist eine deutliche Abflachung der FH-Zellen zu erkennen, da die Werte der Zelllängen unter die der Zellbreite fallen. Am deutlichsten wird dies im Jahr 1960.

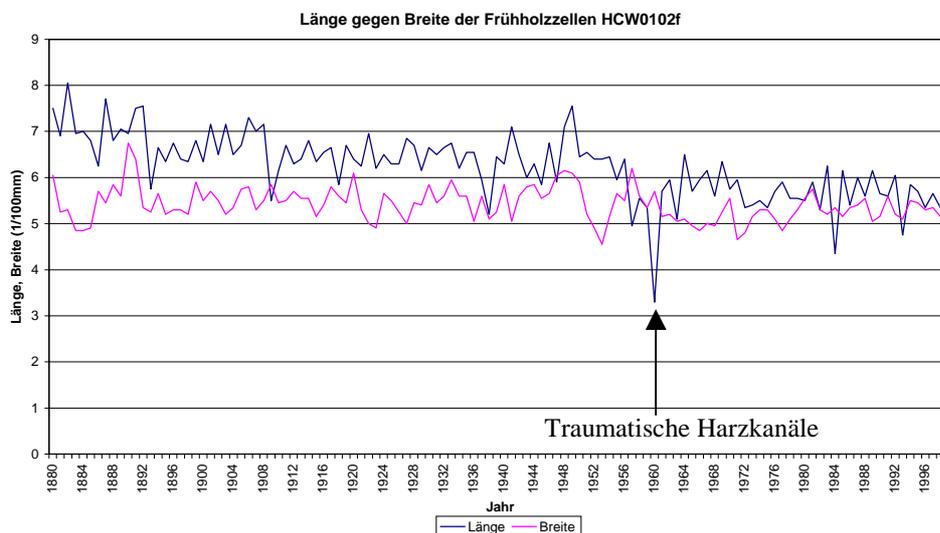


Abb 26: Diagramm der durchschnittlichen Zelllänge und –breite pro Jahr gemittelt aus je 20 gemessenen Zellen. Auffallend ist das gleichbleibende Niveau der Zellbreite, während die Zelllänge einen absteigenden Trend aufweist. Zwischen 1957 und 1960 unterschreiten die Längen- die Breitenwerte deutlich, am deutlichsten 1960 durch das Auftreten der traumatischen Harzkanalreihe. Ab diesem Jahr wird das vorherige Längenniveau nicht mehr erreicht.

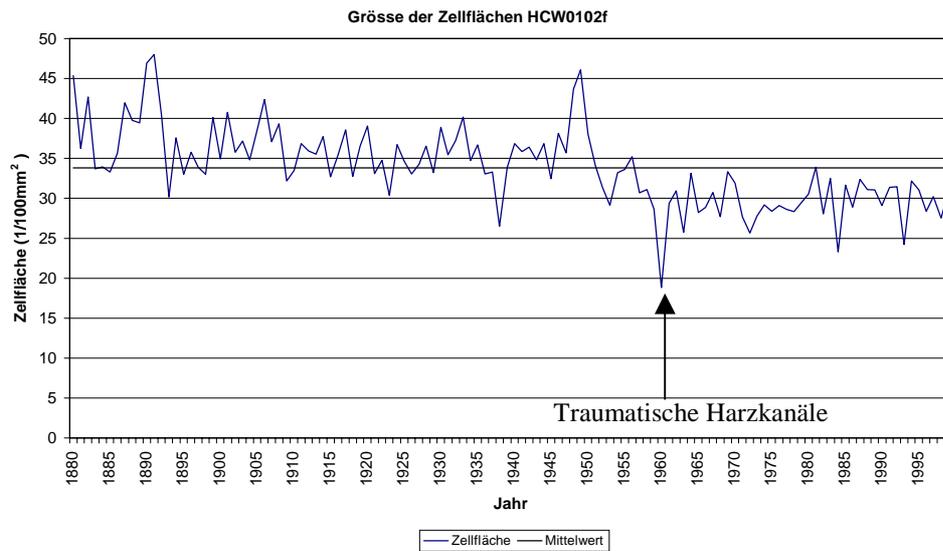


Abb. 27: Darstellung der Flächenwerte der Frühholzzellen (Zellgröße). In dieser Darstellung wird der ab 1957/1960 einsetzende Niveauunterschied der Zellgröße deutlich, der maßgeblich durch einen Rückgang der Zelllängen gesteuert wird (vergleiche Abbildung 26).

Der entsprechende Jahrring (1960) ist durch das Auftreten einer tangentialen Reihe traumatischer Harzkanäle geprägt. Der genannte Zeitraum ist auch in der Jahrringbreitenmessung (Abbildung 25) durch einheitlich reduziertes Wachstum gekennzeichnet. Ab 1961 verlaufen die Größenschwankungen der FH-Zellen auf einem geringfügig niedrigeren Niveau. Dies wird maßgeblich durch eine Reduktion der Zelllängen verursacht.

Der Grund für die Absenkung des Größenniveaus in diesem Beispiel ist nicht eindeutig. Auslöser scheint eine mechanische Störung zu sein, die allgemein eine geringfügige Reduktion der FH-Zellgrößen verursacht. Ob allerdings auch ein Andauern der veränderten Belastungen zur Niveauabsenkung führte, kann nicht geklärt werden.

Allgemein bleibt festzuhalten, daß die Größe der FH-Zellen größeren interannuellen Schwankungen unterliegt. Über den Verlauf mehrerer Jahre und Jahrzehnte betrachtet erkennt man allerdings, daß sich die Schwankungen auf einem einheitlichen, leicht abnehmenden Niveau befinden. Mechanische Belastungen wirken sich dabei vornehmlich auf die Länge der Zellen aus, die Zellbreite bleibt weitgehend unbeeinflusst.

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß es deutliche Strukturunterschiede bei Wurzeln unterschiedlicher Tiefenlage gibt, obwohl diese nicht freigelegt sind. Der mögliche Einfluß eines abnehmenden Bodendruckes wie auch steigender Temperaturschwankungen in geringeren Bodentiefen wird in Kapitel 5.4 diskutiert.

Die Jahrringstruktur flachgründig gewachsener *Larix decidua* und *Picea abies* Wurzeln ist durchaus mit der des Stammes vergleichbar (vergleiche Abb. 18 **B** und 21 **B**).

Dies wird vor allem an den zuvor angeführten Veränderungen der Ausprägung der Spätholzzellen deutlich. Der Anstieg der Zellanzahl in Zusammenhang mit einer Zunahme der Zellwandstärke vermittelt einen optisch dichteren Eindruck, da die äußere Zellgröße selbst nicht zunimmt. Vielmehr verringert sich das innere Zellvolumen, woraus sich auch auf veränderte mechanische Eigenschaften schließen läßt, in diesem Fall auf eine Stabilisierung der Struktur (siehe Kapitel 5.5). Gleiches gilt grundlegend auch für die Wurzelstruktur von *Pinus cembra*. Die genannten Veränderungen der Spätholzstruktur bei dieser Baumart sind weniger deutlich ausgeprägt, aber doch vergleichbar. Hierbei scheint es sich um eine artspezifische Eigenschaft zu handeln, da auch das Stammholz von *Pinus cembra* ein nur schwach ausgeprägtes Spätholz aufweist (Schweingruber 1990: 119).

Weiterhin wirken sich mechanische Belastungen negativ auf die Länge (radiale Richtung im Querschnitt) der Frühholzzellen aus. Diese Erscheinung wurde hauptsächlich in Jahrringen mit geringem Spätholzanteil festgestellt. Ist der Jahrring wie auch das Spätholz stark ausgebildet, wird die allgemeine Zellgröße leicht reduziert. Darüber hinaus wird eine gleichmäßige Längenreduktion mit zunehmendem Wurzelalter festgestellt. Die Zellbreite hingegen scheint von diesen Faktoren weitgehend unbeeinflusst. Bereits hier zeigt sich, daß die bisherige Praxis, die einfache Zellgröße (Anzahl der Zellen pro mm<sup>2</sup> oder auch einfacher Zelldurchmesser, häufig ohne Angabe der Meßrichtung) als Parameter zu verwenden (u.a. FAYLE 1968), ungenau ist.

Der bisherigen Aussage, daß freigelegte Wurzeln eine generell stammähnlichere Ausprägung besitzen, wird durch die aufgezeigten Veränderungen nicht freigelegter Wurzeln die Aussagekraft genommen. Es müssen folglich andere Kriterien herangezogen werden.

Im abschließenden Beispiel einer nicht freigelegten *Larix decidua* Wurzel am Rand der Murrinne Bruchi bei Blatten / Naters, wird eine Besonderheit vorgestellt, die bei Wurzeln bisher ausgeschlossen wurde. Der Querschnitt einer 8cm unter der Oberfläche gewachsenen *Larix decidua* Wurzel zeigt einen deutlich ausgeprägten Frostring (Abbildung 28). Das Auftreten von Frostringen in Wurzeln ist aus der Literatur bisher nicht bekannt und wurde auch weithin ausgeschlossen (SCHWEINGRUBER 2001).

Das Auftreten von Frostringen im Stammholz ist ein bekanntes Merkmal, das häufig zur Bestimmung von Frosteinbrüchen zu Beginn oder gegen Ende der Wachstumsperiode eines Baumes oder auch zur Rekonstruktion vergangener vulkanischer Aktivitäten genutzt wird (LAMARCHE & HISCHBOECK 1984, 1985; SCHWEINGRUBER 1996; STAHL 1990).

Obwohl es einige Arbeiten zur Frosttoleranz der Wurzeln, unter anderem von *Pinus sylvestris* oder *Picea mariana* gibt, wurde bisher nie auf die Existenz von Frostringen hingewiesen. Die Arbeiten konzentrieren sich auf die Auswirkungen eines Absterbens der Wurzeln durch Frost auf das Stammwachstum (BIGRAS 1997, STATTIN & LINDSTRÖM 1999, SUTINEN et al. 1999).

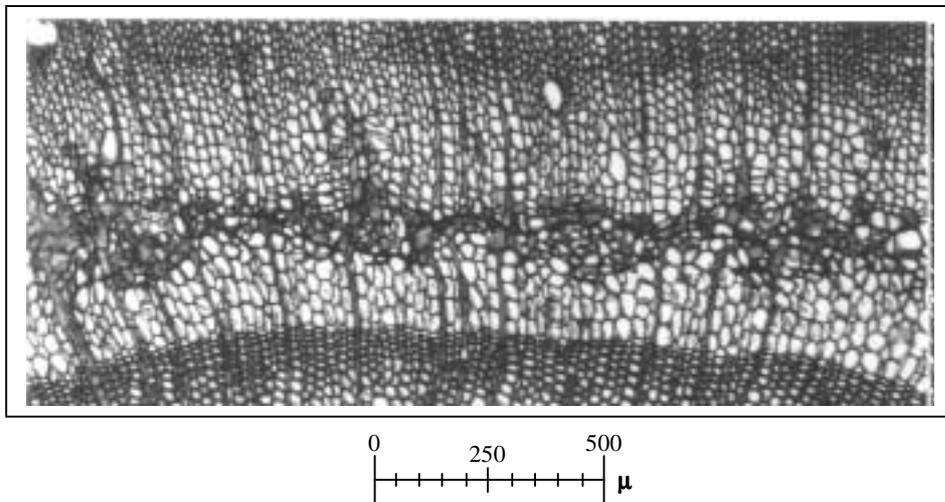


Abb. 28: Frostring im Frühholz einer *Larix decidua* Wurzel. Die Wurzel wurde in 8cm Tiefe zwischen zwei Blöcken einer Murablagerung entnommen.

Die untersuchte Wurzel zeigt eine gleichmäßige Steigerung der Jahringbreite wie auch eine zunehmend deutlichere Ausprägung der Spätholzzellen (Abbildung 29). Die Größe der Frühholzzellen zeigt allerdings auf der Wurzeloberseite, unmittelbar nach dem Auftreten des Frostringes 1995 eine starke Reduktion, die erst 1997 wieder auf das vorherige Niveau zurückkehrt. Auf der Wurzelunterseite ist dies nicht festzustellen. Hier ist auch der Frostring weniger stark ausgeprägt. Im Stamm der Lärche ist kein Anzeichen für einen Frostring vorhanden.

Die deutlich stammähnliche Ausprägung des Spätholzes ab 1995 deutet auf eine geringere Distanz zur Oberfläche in diesem Jahr hin.

*Larix decidua* Wurzel (15-fach)

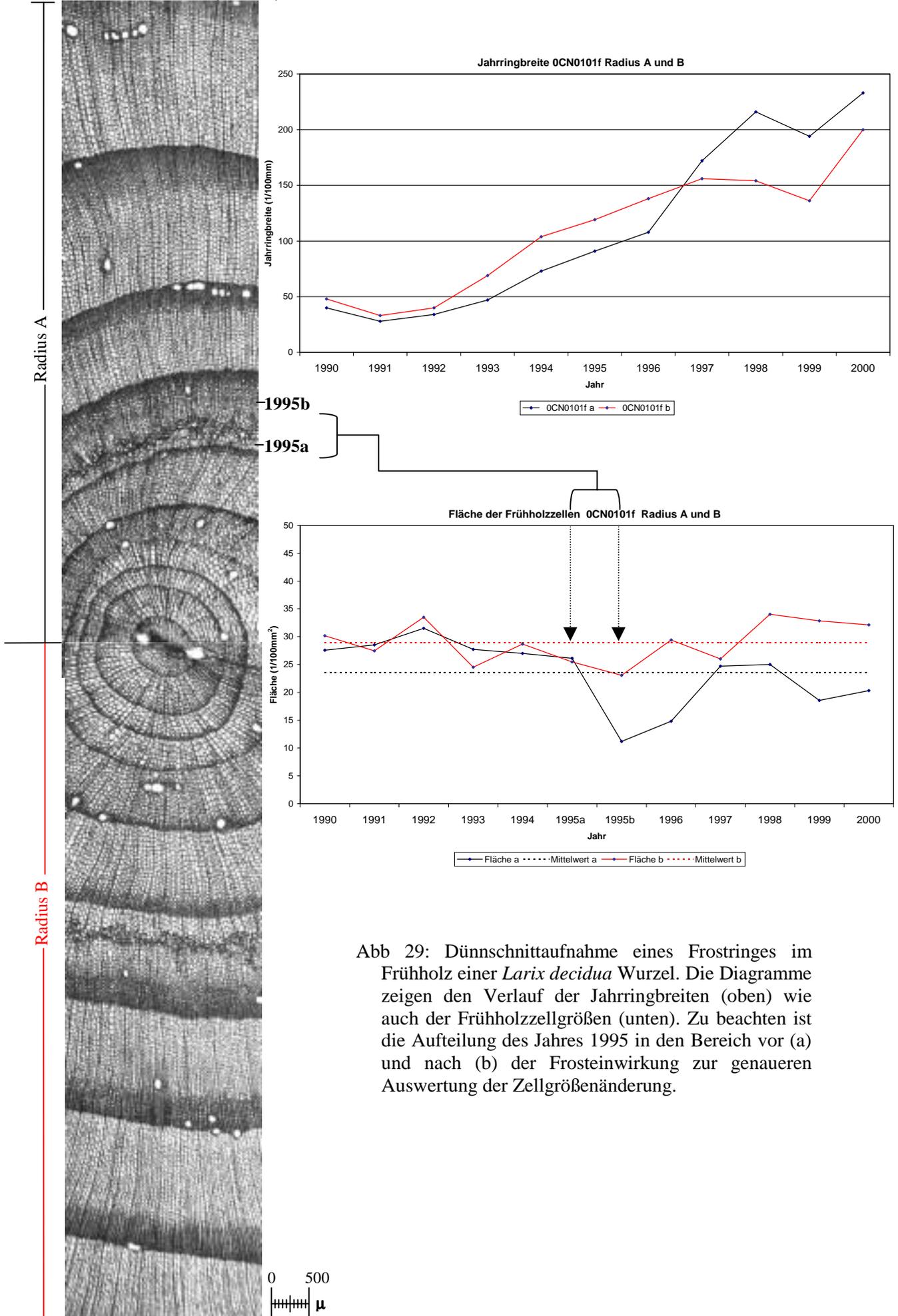


Abb 29: Dünnschnittaufnahme eines Frostringes im Frühholz einer *Larix decidua* Wurzel. Die Diagramme zeigen den Verlauf der Jahrringbreiten (oben) wie auch der Frühholzzellgrößen (unten). Zu beachten ist die Aufteilung des Jahres 1995 in den Bereich vor (a) und nach (b) der Frosteinwirkung zur genaueren Auswertung der Zellgrößenänderung.

## 5.2 Strukturen freigelegter Wurzeln

Wie die Ergebnisse der Auswertung nicht freigelegter Wurzeln gezeigt haben, ist eine stammähnliche Ausprägung der Jahrringstruktur kein Zeichen für eine Freilegung. Sie deutet jedoch auf ein Wachstum nahe der Oberfläche hin. Somit kann dieses Kriterium zumindest im Rahmen der makroskopischen Auswertung in einigen Fällen zur Eingrenzung des Freilegungszeitpunktes herangezogen werden.

Zeigt eine Wurzel im Laufe der Jahrringabfolge eine deutlichere Spätholzausprägung und somit eine deutlichere Jahrringstruktur, deutet dies auf eine Annäherung an die Oberfläche hin. Der Freilegungszeitpunkt ist also frühestens in den auf diese Veränderung folgenden Jahren zu erwarten. Bei von Beginn an dicht unter der Oberfläche wachsenden Wurzeln scheidet dieses Kriterium allerdings aus, da die Jahrringstruktur schon zu Beginn des Wachstums deutlich ausgeprägt ist.

Die weiteren Analysen beziehen sich folglich hauptsächlich auf sich verändernde Ausprägungen der Wurzelzellen, wobei die Jahrringausprägung aber nicht außer Acht gelassen wird.

Gemäß der eingangs formulierten Hypothesen der Arbeit ist die deutlichste Reaktion auf eine Freilegung dann zu erwarten, wenn diese einen schnellen Wechsel der Umgebungsbedingungen nach sich zieht. Bei einer langsamen Freilegung, zum Beispiel durch kontinuierlichen Bodenabtrag über mehrere Jahre hinweg, ist eher von einer graduellen Veränderung der Strukturen auszugehen. Die unterschiedlichen Strukturen der nicht freigelegten Wurzeln stützen diese Hypothese.

Im Folgenden wird die Merkmalsbestimmung einer Freilegung an einigen Beispielen präsentiert. Da es sich gezeigt hat, daß die Auswirkungen einer Freilegung im Verlauf einer Wurzel durchaus eng begrenzt sind, werden die entsprechenden Reaktionen zunächst ausführlich am Beispiel einer Wurzel aufgezeigt, die in ihrem Verlauf unterschiedlichen Arten der Freilegung unterworfen war und somit Merkmale einer schnellen wie auch einer kontinuierlichen Freilegung zeigt. Im Anschluß werden diese Merkmale an weiteren Beispielen verschiedener Wurzeln, die von verschiedenen Arten der Freilegung betroffen waren, gestützt.

Das einführende Beispiel bezieht sich auf die Auswertung einer *Larix decidua* Wurzel aus der Murrinne des Birchbaches bei Randa. Das Gerinne wurde bereits im Rahmen der erwähnten Diplomarbeiten im Jahr 1994 (GÄRTNER 1996, HOLL 1996) im Maßstab 1:1000 kartiert.

Die Rinne ist charakterisiert durch das Auftreten kleinerer, episodischer Murschübe, die aufgrund der Breite des Gerinnebettes nur vereinzelt zur Erosion der Seitenwände führen. Das Gerinne selbst wird im Bereich des ausgewählten Standortes (1345m NN) durch ca. 2m hohe Levées begrenzt, die im Außenbereich durch natürlichen Pflanzenbewuchs (hauptsächlich Gräser, Birken und Lärchen) stabilisiert sind. Vereinzelt sind anhand der Zusammensetzung und Sortierung des Substrates künstliche Aufschüttungen zur dauerhaften Eindämmung des Gerinnes nachweisbar.

Im Bereich des orographisch linken Levées wurde auf der Seite der Murrinne eine *Larix decidua* Wurzel beprobt, die durch seitliche Erosion teilweise freigelegt wurde. Die Position der Wurzel (vergleiche Abbildung 30) auf halber Höhe der seitlichen Gerinnewand (80cm oberhalb des Gerinnebettes) sowie die Spuren einer durch sekundäre Sturzprozesse leicht überprägten seitlichen Unterschneidung führen zu dem Schluß, daß die Freilegung durch einen Murprozeß erfolgte. Informationen über das Gerinneprofil und die auch bei stärkeren Niederschlagsereignissen relativ geringe Wasserführung des Gerinnes schließen eine Unterschneidung durch einen dauerhaften fluvialen Prozeß aus.

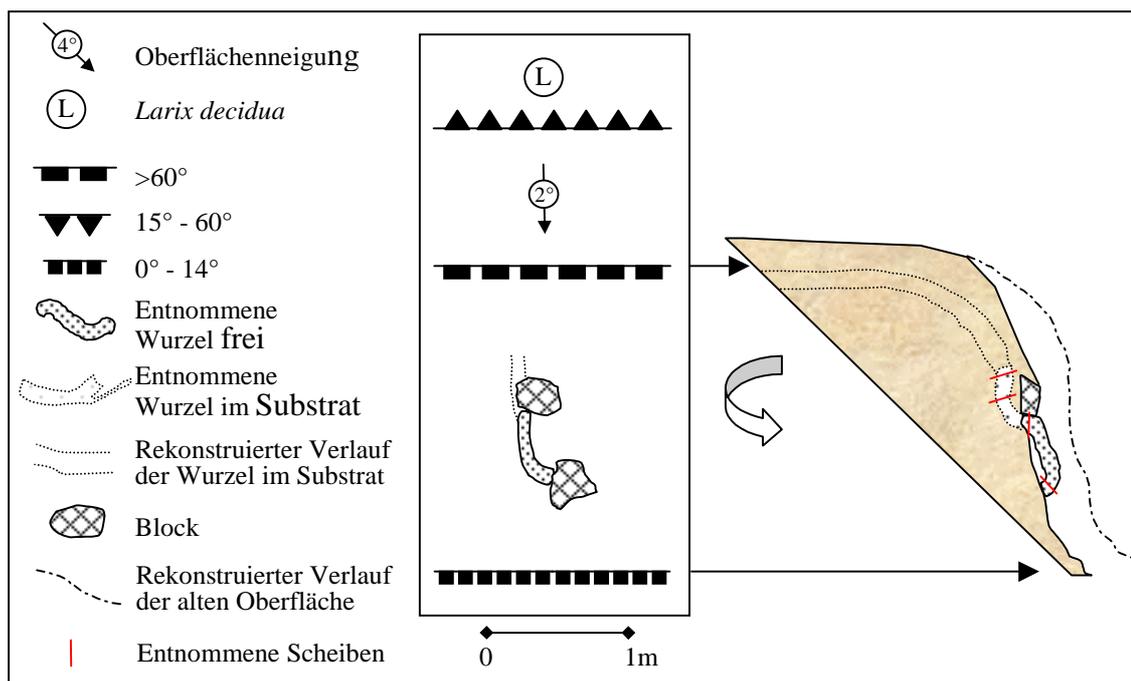


Abb. 30: Generalisierte Darstellung der Entnahmesituation der Wurzel HCB0101f an der Seite der Murrinne Birchbach, Mattertal, Schweiz.

Der Verlauf der nicht freigelegten Wurzel wurde durch vereinzelte Grabungen bis zu ihrem Ursprung verfolgt. Die auf diese Weise ermittelte Lärche fand sich in einer horizontalen Distanz von 1,8m zur Probenahmestelle auf der bewachsenen Aussenseite des Uferwalles (Levéé) der Murrinne.

Der rekonstruierte Verlauf der Wurzel ist Abbildung 30 zu entnehmen. Im Verlauf ihrer vertikalen Erstreckung in Richtung des Gerinnes befindet sich die Wurzel in 15 – 20cm Tiefe. Auch im Bereich des konvexen Übergangs zur inneren Gerinnewand bleibt die Tiefenlage im Verhältnis zur Oberflächenveränderung zunächst gleich. Dies ändert sich erst mit zunehmender Annäherung an die Stelle der Freilegung. Die Wurzel zeichnet damit den früheren Verlauf der Oberfläche nach.

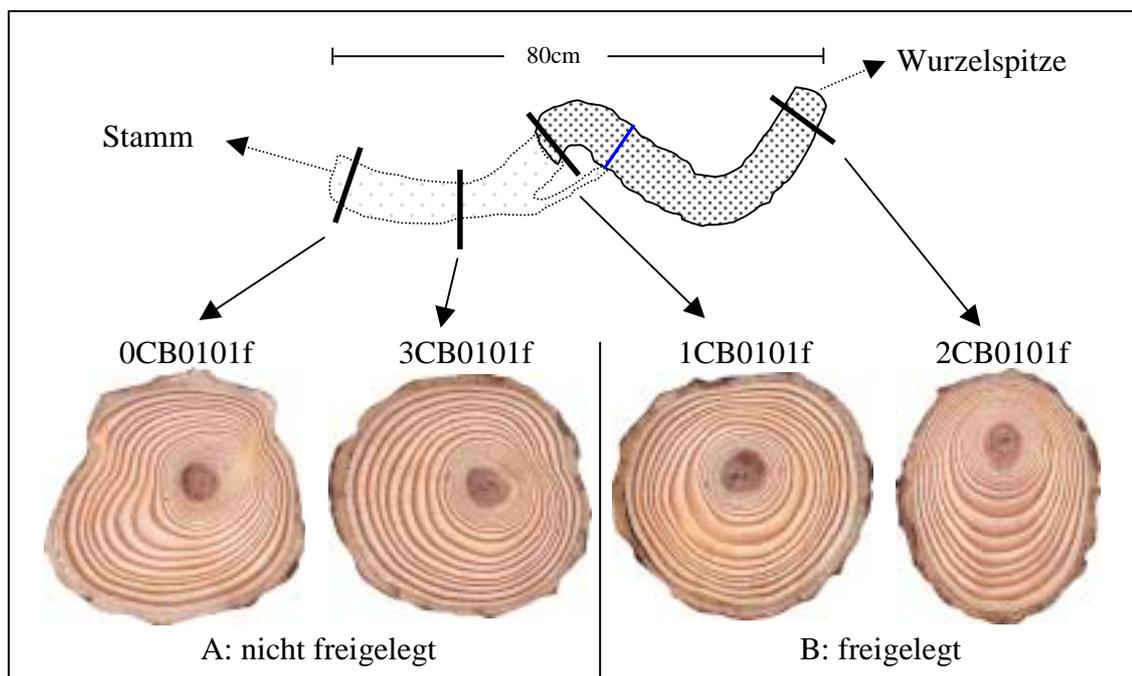


Abb. 31: Scanbilder der entnommenen Scheiben der *Larix decidua* Wurzel HCB0101f und der entsprechenden Position in der Gesamprobe. Die blaue Markierung im dunkel dargestellten (freigelegten) Teil der Probe kennzeichnet die Grenze zwischen schneller und kontinuierlicher Freilegung gemäß der Geländeansprache. Die Oberseite der Scheiben entspricht jeweils der Orientierung der Wurzel in Richtung der Bodenoberfläche, vergleiche Abb. 30.

Die Auswertung des weiteren Verlaufes der Gerinnewand zeigte deutliche Spuren älterer Murablagerungen (Levééreste) in einer Position, die der Höhe der freigelegten Wurzel entspricht. Daraus wird geschlossen, daß die Wurzel teilweise durch einen Murgang freigelegt wurde. Der obere Teil des freigelegten Wurzelstückes zeigte dagegen deutliche Hinweise auf eine Freilegung durch auf das Mureignis folgende Sekundärprozesse. Dabei handelt es sich zunächst um ein Nachstürzen des unterschrittenen Materials begleitet von einer Verspülung durch Niederschlagsereignisse.

Kleine Spülrinnen in der direkten Umgebung der Wurzel stützen diese Theorie. Eine weitere Freispülung der Wurzel wurde durch einen Felsblock verhindert, der unmittelbar über der Wurzel aus dem Substrat ragt.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, daß der untere Teil der Wurzel durch ein Ereignis schnell freigelegt, der obere Teil dagegen kontinuierlich über mehrere Jahre weiter aus dem Substrat gelöst wurde (Blaue Markierung in Abb. 31).

Bei der Probenentnahme wurde die Wurzel weiter freigegeben und der gesamte freigelegte Anteil wie auch ein 30cm langes Stück aus dem nicht freigelegten oberen Bereich entnommen. Zur Auswertung wurden aus der insgesamt 80cm langen Probe vier Scheiben herausgetrennt (Abbildung 31, zum Vergleich rote Markierungen in Abbildung 30). Je eine Scheibe im unteren, schnell freigelegten wie auch dem kontinuierlich freigelegten Teil der Wurzel, letztere 2cm vor dem Übergang in das Substrat. Für Vergleichszwecke wurden auch zwei Scheiben der nicht freigelegten Probe in je 15cm Abstand entnommen.

Die makroskopische Auswertung der Scheiben ergab zunächst ein relativ einheitliches Bild. Alle vier Scheiben zeigen in den Jahren 1990 – 1999 ein deutlich stammähnliches Wachstum (Abbildung 31), d.h. eine klare Differenzierung der Früh- und Spätholzanteile, deutlich erkennbare Jahrringgrenzen wie auch unterschiedliche Ausprägungen exzentrischen Wachstums, das auf unterschiedliche mechanische Belastungen schließen läßt. Unter Berücksichtigung der Ausführungen in Kapitel 5.1 ist dieser Befund nicht sehr überraschend, da die nicht freigelegten Scheiben in 8cm (3CB0101f) und 3cm (0CB0101f) Bodentiefe entnommen wurden.

Ein gemeinsames Merkmal der Scheiben gibt einen deutlichen Hinweis auf eine starke mechanische Belastung der Wurzel. Der Jahrring 1978 zeigt eine umlaufende Reihe traumatischer Harzkanäle in den Proben 0-, 1-, und 2CB0101f. In der Probe 3CB0101f sind diese nicht ausgeprägt. Die Auswertung der Jahrringbreitenmessung zur Altersbestimmung ergab keine Hinweise auf ein Ausfallen dieses Jahrringes in der entsprechenden Probe. Eine Erklärung für das Ausbleiben der Harzkanäle in dieser Probe scheint ihre Position im Substrat zu bieten (Abbildung 30). Die Scheibe wurde, wie auch die Probe 2CB0101f, die einen geringen Anteil an Harzkanälen 1978 zeigt, aus einem horizontal verlaufenden Bereich der Wurzel entnommen. Sie war zudem durch den überlagernden Block vor stärkeren Verbiegungen geschützt. Die vertikal verlaufende Wurzel scheint durch die einwirkenden Kräfte des Ereignisses stärker beeinflusst zu sein, da die Harzkanäle hier ihre deutlichste Ausprägung haben.

Dieses Anzeichen einer Störung deckt sich mit Informationen über einen Murgang im Jahre 1978 im Gerinne des Birchbaches (mündliche Mitteilung von Anwohnern während der Geländeerhebung 1994) und kann somit als erster Hinweis auf die Freilegung gedeutet werden.

Bei stärkerer Vergrößerung unter dem Binokular zeigen die inneren Jahrringe weniger deutliche Jahrringgrenzen. Das Spätholz ist schwach und unregelmäßig ausgeprägt, die Frühholzzellen erscheinen etwas größer. In Probe 2CB0101f ist im Jahrring 1979 eine Reduktion der Größe der Frühholzzellen erkennbar, wodurch ein optisch dichter Eindruck dieses und der folgenden Jahrringe entsteht. Einheitliche Reaktionen über die Ausbildung der Harzkanäle hinaus oder Unterschiede der freigelegten gegenüber den nicht freigelegten Proben sind aber nicht zu erkennen.

Ein anderes Bild bietet sich bei der mikroskopischen Auswertung der Dünnschnitte der entsprechenden Proben.

Abbildung 32 zeigt zwei Dünnschnittpräparate aus vergleichbaren Positionen der Oberseite der Wurzelscheiben 2CB0101f (freigelegt) und 0CB0101f (nicht freigelegt, Entnahmetiefe 3cm). Die Bildausschnitte wurden so gewählt, daß vergleichbare Jahrringabfolgen gegenübergestellt sind. In beiden Ausschnitten sind drei Bereiche unterschiedlicher Ausprägung der Jahrringstruktur zu erkennen (A, B und C in Abbildung 32). Diese Bereiche entsprechen in ihrer Struktur der Ausprägung nicht freigelegter Wurzeln aus verschiedenen Bodentiefen.

Bis 1969 (**Bereich A**) zeigt die Struktur eine typische Ausprägung tiefgelegener Wurzeln. Die Spätholzzellen sind undeutlich und unregelmäßig ausgebildet (geringe Zellwandstärke, großes Zellvolumen), ein Jahrring wird maßgeblich nur von einer tangentialen SH-Zellreihe begrenzt. Die Anzahl der Frühholzzellen schwankt zwischen einer und maximal drei radialen Zellreihen.

Ab 1970 (**Bereich B**) steigt die Anzahl der Frühholzzellen deutlich an, die Spätholzzellen sind geringfügig deutlicher ausgebildet. Dies äußert sich in einer steigenden Zellwandstärke, vereinzelt aber auch in einem leichten Anstieg des inneren Zellvolumens, wobei hier deutliche Schwankungen erkennbar sind.

Der **Bereich C** bietet zunächst die Merkmale eines Wachstums nahe der Oberfläche. Eine deutlich ausgebildete Spätholzzone (deutlich höhere Zellwandstärke, reduziertes Zellvolumen, gestiegene Zellanzahl) ist erkennbar. Bezüglich der Ausbildung der Frühholzzellen gibt es jedoch eindeutige Unterschiede. Dies gilt auch für die zeitliche Ausdehnung des Bereiches **B** und daraus folgend für das Einsetzen der Merkmale des C-Bereiches.

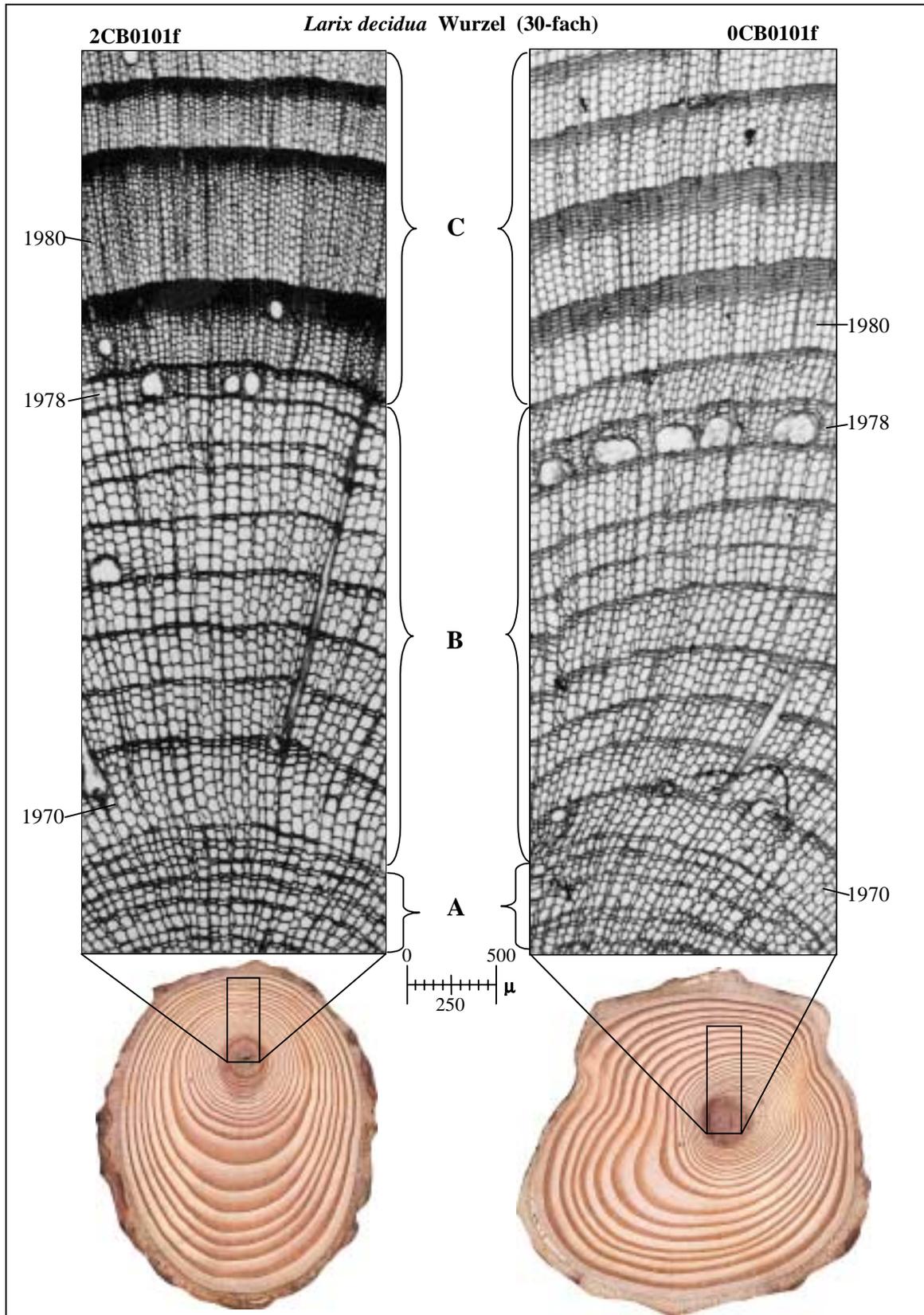


Abb. 32: Vergleich der Struktur einer schnell freigelegten (links) mit der einer nicht freigelegten (rechts) Wurzelprobe von HCB0101f. Zu erkennen sind drei Zonen (A,B,C) mit typischen Strukturen unterschiedlicher Tiefenlage. Die freigelegte Probe zeigt in Abschnitt C allerdings eine deutliche Reduktion der Größe der Frühholzzellen. Deutlich ausgeprägt ist das Jahr der Störung (Harzkanäle in 1978) in beiden Proben.

Betrachtet man zunächst den Jahrring 1978, so fällt auf, daß es Variationen in der Größe der Frühholzzellen gibt. In der direkten Umgebung der Harzkanäle (rote Pfeile in Abbildung 32) ist sowohl die Breite wie auch die Länge der Zellen reduziert. Sind die Harzkanäle weniger dicht angeordnet, beschränkt sich die Reduktion auf die Länge der Zellen. Diese Erscheinung wurde in allen Präparaten, die traumatische Harzkanäle aufweisen, festgestellt (vergleiche auch Abbildung 26).

Die nicht freigelegte Wurzel zeigt im Folgejahr (1979) wieder die gleiche Ausprägung wie 1977. Die Richtungsänderung der Zellreihen ist auf die vorausgegangene starke mechanische Beanspruchung zurückzuführen. Erst 1980 beginnt die deutliche Ausprägung der Spätholzzellen und damit der Bereich C, der die Merkmale eines Wachstums nahe der Oberfläche zeigt. Die Frühholzzellen zeigen keine eindeutigen Größenänderungen.

Die freigelegte Probe 2CB0101f dagegen zeigt im Jahrring 1979 eine deutliche Reduktion der Breite wie auch der Länge der Frühholzzellen, die auch in den Folgejahren unverändert bleibt. Messungen der Breiten wie auch der Längen der Frühholzzellen der beiden Proben bestätigen diesen Eindruck (Abbildungen 33 und 34). Bei beiden Proben ist zunächst eine maßgebliche Reduktion der Länge der Frühholzzellen 1978 zu erkennen.

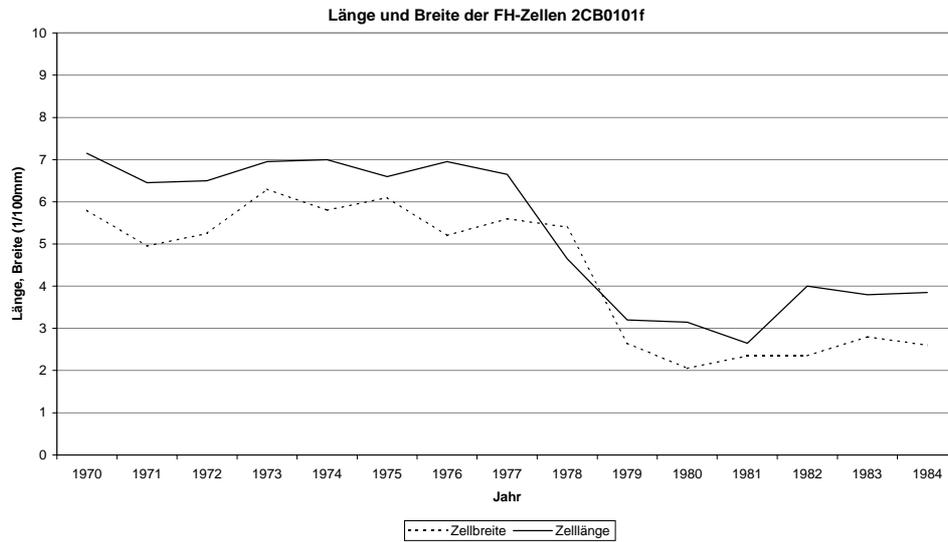


Abb. 33: Diagramm der Länge und Breite der Frühholzzellen der freigelegten Probe 2CB0101f. 1978 unterschreitet der Wert der Länge den der Breite der Zelle durch das Auftreten traumatischer Harzkanäle. Danach erfolgt eine weitere Reduktion beider Werte, wobei die Breite erneut unter die Werte der Länge absinkt. Beide Größen verbleiben in den Folgejahren auf niedrigerem Niveau gegenüber den Jahren vor der Störung.

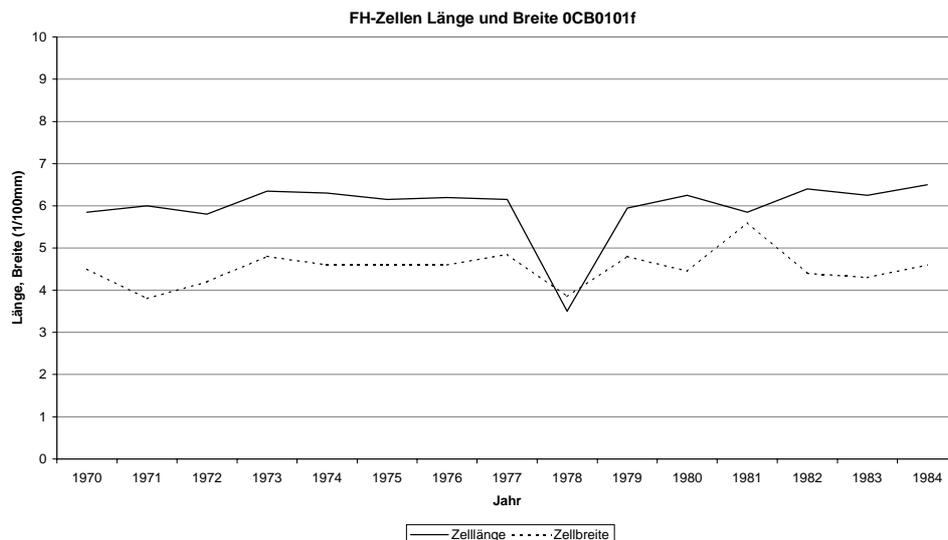


Abb. 34: Diagramm der Länge und Breite der Frühholzzellen der nicht freigelegten Probe 0CB0101f. 1978 (wie bei 2CB0101f, Abb. 33) unterschreitet der Wert der Länge den der Breite der Zelle durch das Auftreten traumatischer Harzkanäle. Im Folgejahr kehren beide Werte wieder auf das alte Niveau zurück.

Die Länge der Zellen unterschreitet in diesem Jahr der Störung in beiden Proben den Wert der Breite. Im Jahr 1979 ist das relative Größenverhältnis der Längen- und Breitenwerte wieder hergestellt. Während allerdings die Wert der nicht freigelegten Probe wieder auf das alte Größenniveau zurückkehren, sinken die Werte der freigelegten Wurzel deutlich ab.

Die Größe (Flächenwert) der Frühholzzellen der freigelegten Probe wird dabei im Folgejahr um mehr als 50% reduziert und verbleibt auf diesem Niveau (Abbildung 35).

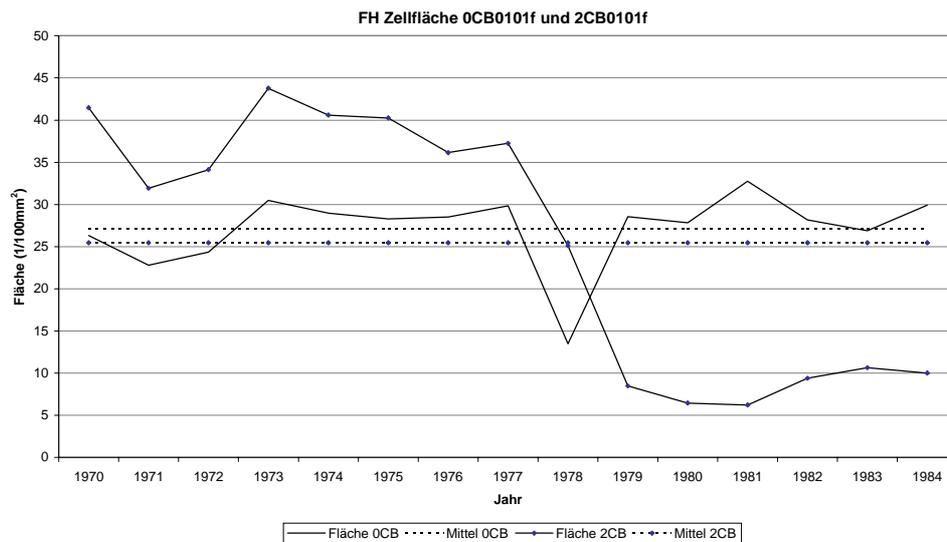


Abb. 35: Vergleichendes Diagramm der Größe der Frühholzzellen (Flächenwert, Länge \* Breite der Zellen) der freigelegten (2CB0101f) und der nicht freigelegten (0CB0101f) Probe. Zu erkennen ist die deutliche Größenreduktion in der freigelegten Probe nach der Störung 1978.

Eine solche Reduktion der Größe (Fläche auf Grundlage der radialen Länge und tangentialen Breite der Zellen im Querschnitt) um durchschnittlich 50% der Frühholzzellen wurde bei der Auswertung aller untersuchten Wurzelproben nur in den Proben nachgewiesen, die freigelegt waren. Dieser Parameter kann also als eindeutiges Kriterium einer Freilegung verwendet werden. Ein deutlicher Anstieg der Stärke der Zellwände im Frühholz ist dabei nicht nachzuweisen.

Durch die Reduktion der Zellgröße und den dadurch oftmals bedingten Anstieg der Zellanzahl im Frühholz entsteht häufig ein optisch dichter Eindruck im Jahrringbild, das heißt die entsprechenden Jahrringe wirken im Dünnschnitt dunkler. Dieser Effekt tritt bei makroskopischer Betrachtung der Jahrringe nicht eindeutig auf. Das ist wahrscheinlich auf die Zellinhaltsstoffe zurückzuführen, die die Zellwände nicht deutlich erkennen lassen.

Eine Graustufenanalyse der entsprechenden Jahrringe der freigelegten Probe bestätigen zunächst diesen Eindruck (Abbildung 36).

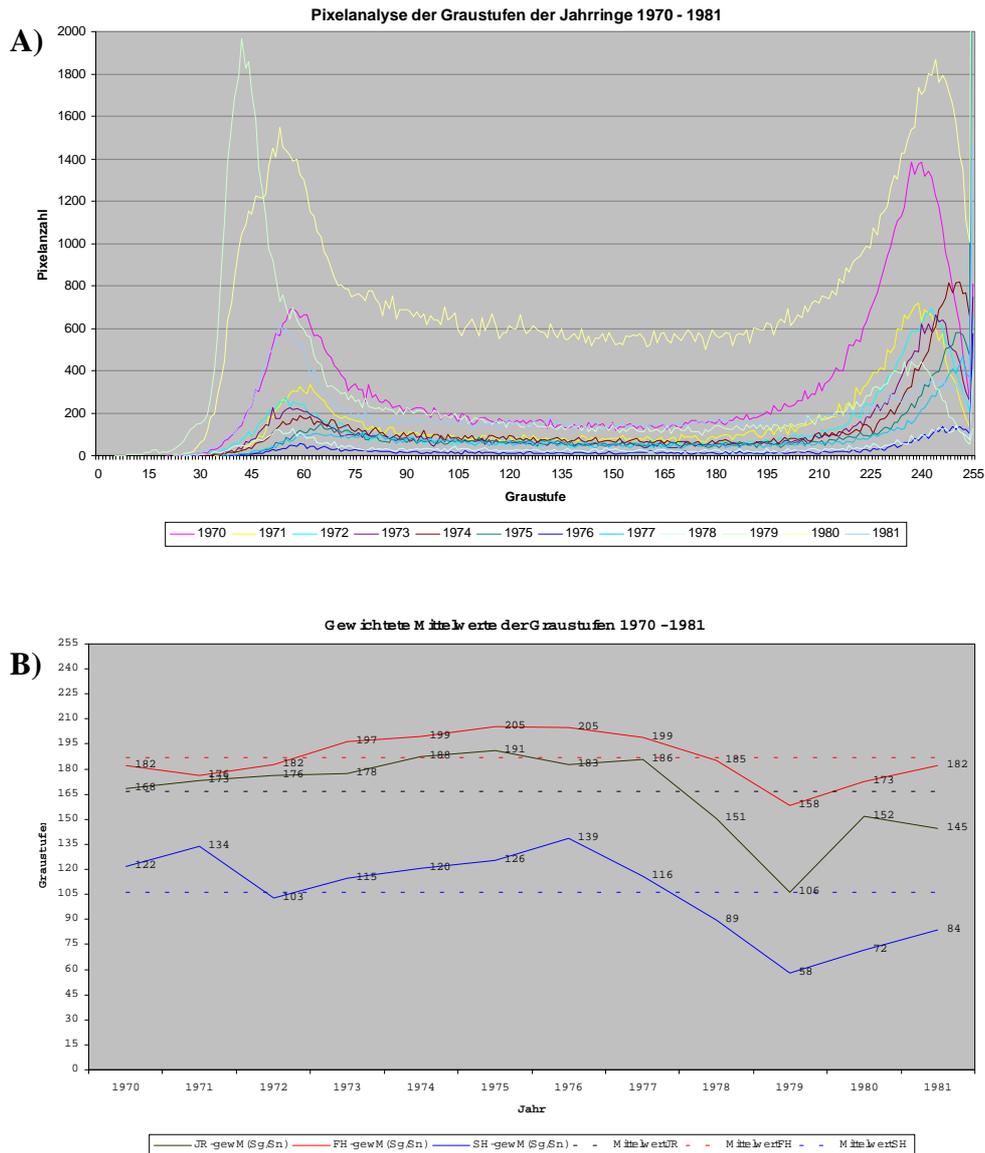
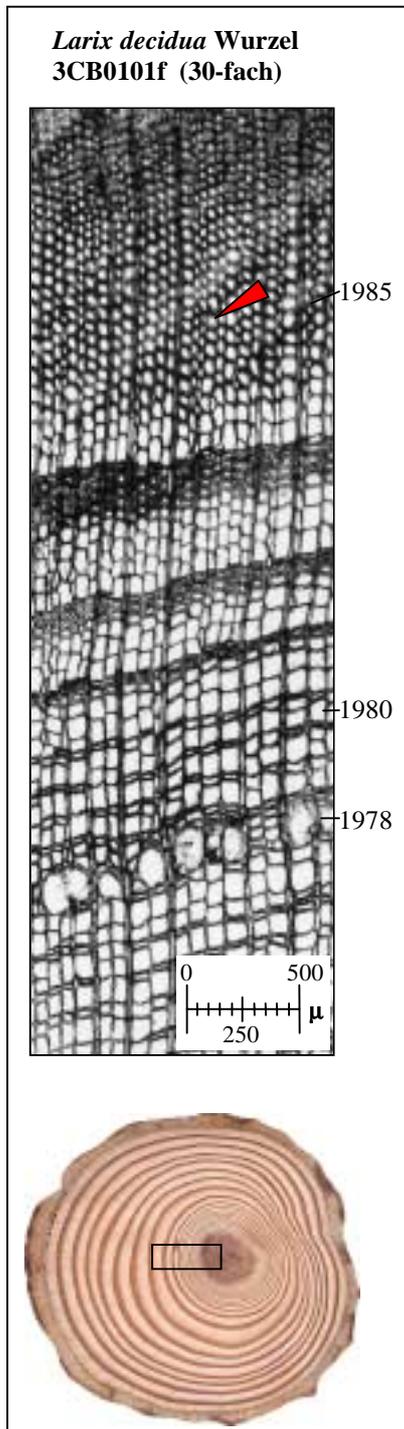


Abb. 36: Diagramme der Graustufenanalysen (Graustufenwerte 0 = schwarz bis 255 = weiß) der freigelegten Probe 2CB0101f für die Jahrringe 1970 bis 1981. **A)**: Diagramm der von der Bildgröße abhängigen Pixelanzahl der Graustufen 0 bis 255 der einzelnen Jahrringe. **B)**: Diagramm der Bildgrößen und damit Jahrringbreiten unabhängigen gewichteten mittleren Graustufensummen getrennt nach Jahrring (JR, schwarz), Frühholzanteil (FH, rot) und Spätholzanteil (SH, blau).

Die größenabhängige Pixelanalyse zeigt eine, wenn auch uneinheitliche Verschiebung der Spitzen in den dunkleren Bereich. Die Auswertung der gewichteten mittleren Summen, die einen von der Größe des Bildausschnittes unabhängigen Wert angeben, zeigen ab 1979 für die Jahrringe (schwarze Kurve in **B**) eine deutliche Verschiebung in den dunkleren Bereich bei nachfolgend leichtem Anstieg. Gleiches gilt für die Werte des Spätholzanteils (blaue Kurve in **B**). Gerade aber die Werte des Frühholzanteils (rote Kurve in **B**) gehen in der Folge wieder auf das Niveau früherer

Jahre zurück. Mögliche Gründe hierfür werden im Rahmen der Diskussion der angewandten Methoden erörtert (Kapitel 6).



Das Jahrringbild der zweiten nicht freigelegten Probe (3CB0101f) aus 8cm Tiefe zeigt Merkmale eines tiefelegenen Wachstums bis 1981 (Abbildung 37). Darauf folgt ein Übergang mit zunehmend deutlicher ausgebildetem Spätholz in den Jahren 1981, 1982 und 1983 entsprechend der zuvor genannten Kriterien. Eine Zellgrößenreduktion im Frühholz ist nicht zu erkennen. 1985 ist die Ausbildung einer dem Druckholz ähnlichen Struktur zu erkennen (roter Pfeil in Abbildung 37). Dies spricht dafür, daß einsetzende Oberflächenabtrag die relative Tiefenlage der Wurzel verändert hat, die sich ab 1981 schnell auf die Spätholzstruktur auszuwirken begann. Bei der Probe 0CB0101f setzt die verstärkte Ausprägung der Spätholzzellen bereits im Jahr 1980 ein (Abbildung 32). Ein direkter Zusammenhang mit der geringeren Tiefenlage der Wurzel zum Zeitpunkt der Probennahme scheint gegeben.

Die Auswertung der Strukturveränderungen der zweiten freigelegten Wurzelprobe 1CB0101f zeigt ein deutliches Bild einer kontinuierlichen Annäherung an die Oberfläche auf (Abbildung 38). Darüber hinaus zeigt sie auch Merkmale einer langsamen Freilegung durch eine gleichmäßige Veränderung der Größe der Frühholzzellen.

Abb. 37: Dünnschnittaufnahme der nicht freigelegten Probe 3CB0101f. Erkennbar sind die traumatischen Harzkanäle 1978 und die ab 1981 einsetzende Veränderung der Jahrringstruktur. 1985 sind deutlich druckholzähnliche Zellen ausgebildet (roter Pfeil). Das Rechteck im Scanbild der Scheibe markiert die Position des dargestellten Dünnschnittpräparates.

*Larix decidua* Wurzel  
1CB0101f (15-fach)

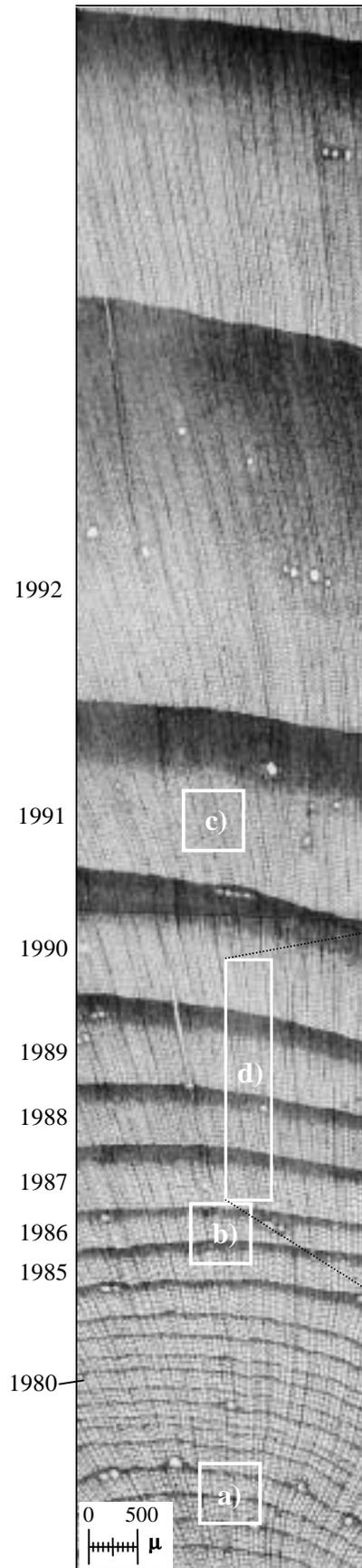
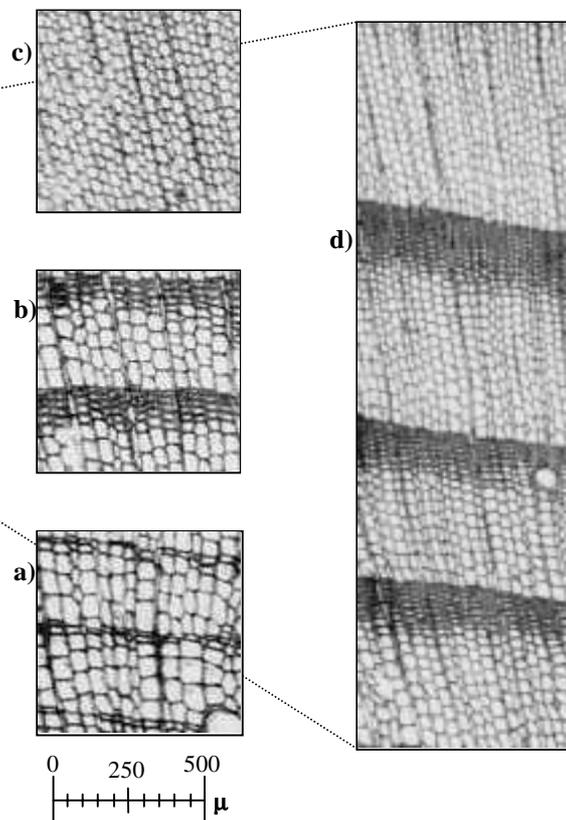
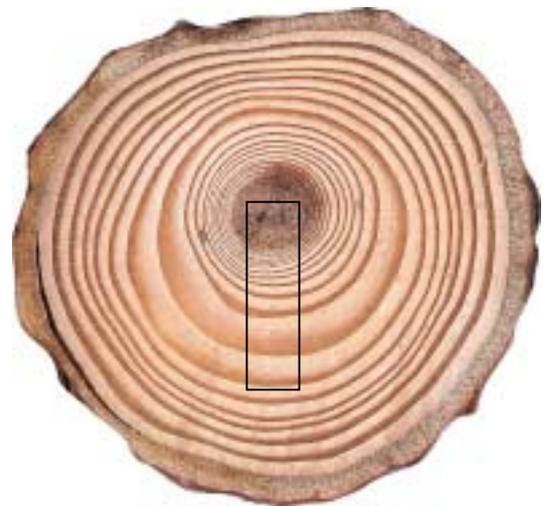


Abb. 38: Dünnschnittaufnahme der langsam freigelegten Probe 1CB0101f. Erkennbar ist die gleichmäßig deutlicher werdende Ausprägung der Spätholzzellen ab 1984. Bis einschließlich 1987 gibt es keine Reduktion der Zellgrößen im Frühholz. Zwischen 1988 und 1990 (d) ist eine kontinuierliche Reduktion erkennbar. Ab 1991 ist die Zellgröße um mehr als 50% reduziert. a), b), c): Ausschnittvergrößerungen der Jahrringe 1973/74, 1985/86 und 1991. Das Rechteck im Scanbild der Scheibe markiert die Position des dargestellten Dünnschnittpräparates.



Der Überblick, den die 15-fache Darstellung des Dünnschnittes bietet, vermittelt zusätzlich den Eindruck einer kontinuierlich steigenden Jahrringbreite, die mit der Veränderung der Struktur einhergeht. Betrachtet man den Verlauf der Jahrringe im Scanbild der Scheibe, trifft das bis 1991 für den gesamten Umfang der Wurzel zu, ab 1992 ist aber eine deutliche Exzentrizität im Jahrringbild erkennbar.

Besonderes Augenmerk ist bei dieser Probe auf die Entwicklung der Größe der Frühholzzellen zu richten. Diese zeigen im gesamten Verlauf bis einschließlich 1987 eine einheitliche Größe. Das gilt sowohl für die Bereiche mit undeutlich entwickeltem Spätholz (Ausschnittvergrößerung **a**) wie auch für die mit deutlich ausgeprägter Spätholzzone (Ausschnittvergrößerung **b**).

Ab 1988 allerdings beginnt eine gleichmäßige Reduktion der Zellgröße, d.h. der Länge wie auch der Breite der Zellen. 1990 ist die Zellgröße bereits um 50% reduziert (Ausschnittvergrößerung **d** und **c**). Eine weitere Vergrößerung oder auch Verkleinerung der Frühholzzellen ist in den folgenden Jahren nicht gegeben.

Die gleichmäßige Reduktion der Zellgröße im Frühholz deckt sich mit der im Gelände rekonstruierten Art der Freilegung dieses Wurzelbereiches. Nicht freigelegte Wurzeln von *Larix decidua*, *Picea abies* oder auch *Pinus cembra* zeigen keine vergleichbaren Reaktionen.

Wie die folgenden Beispiele zeigen werden, gibt es Unterschiede in der grundlegenden Größe (Fläche in  $\text{mm}^2$ ) der Frühholzzellen verschiedener Wurzeln auch der gleichen Baumart. Dennoch zeigen alle freigelegten Wurzeln eine andauernde Größenreduktion der Frühholzzellen um ca. 50% und mehr im Vergleich zu den Zellen der dem Ereignis vorausgegangenen Jahrringe. Dieser Parameter ist das einzige Merkmal, das alle freigelegten Wurzel gemeinsam haben und das sie von nicht freigelegten Wurzeln unterscheidet. Weitere Details und mögliche Einflußfaktoren werden in den Kapiteln 5.3 und 5.4 diskutiert.

An einer Straßenböschung mit einer durchschnittlichen Neigung von 50° und einer Höhe von vier Metern im Mattertal (Straße St. Niklaus – Grächen, 1125m NN) wurden freigelegte Wurzeln von *Picea abies* und *Larix decidua* entnommen. Die Oberfläche der Böschung ist einheitlich ausgebildet und zeigt deutliche Spuren eines einheitlichen Abtrags durch Niederschlagsereignisse. Vereinzelt sind ca. 1cm tiefe Spülrinnen zu erkennen. Beispiele der Auswertung zweier Wurzelproben (1CS0102h, *Picea abies*, Stammdistanz 1,8m ; 1CS0103g, *Larix decidua*, Stammdistanz 2,1m), deren Wachstum entsprechend der Oberflächenneigung in gerader Richtung zur Straße erfolgte, zeigen unterschiedliche Merkmale, die auf eine Freilegung im Jahr 1977 hindeuten. Beide Proben wurden auf gleicher Höhe (1,2m unterhalb der Böschungsoberkante) entnommen. Die Distanz zwischen beiden Wurzeln betrug 10cm, wobei die Oberseite der *Larix decidua* Probe die der *Picea abies* Probe um ca. 2cm überragte. Beide Wurzeln waren im gesamten Umfang freigelegt, ihre Distanz (Wurzelunterseite) zur Oberfläche betrug an der Probenahmestelle 9cm (1CS0103g), respektive 7cm (1CS0102h).

*Picea abies* Wurzel 1CS0102h  
(15-, 40-, 120-fach) Schnelle Freilegung

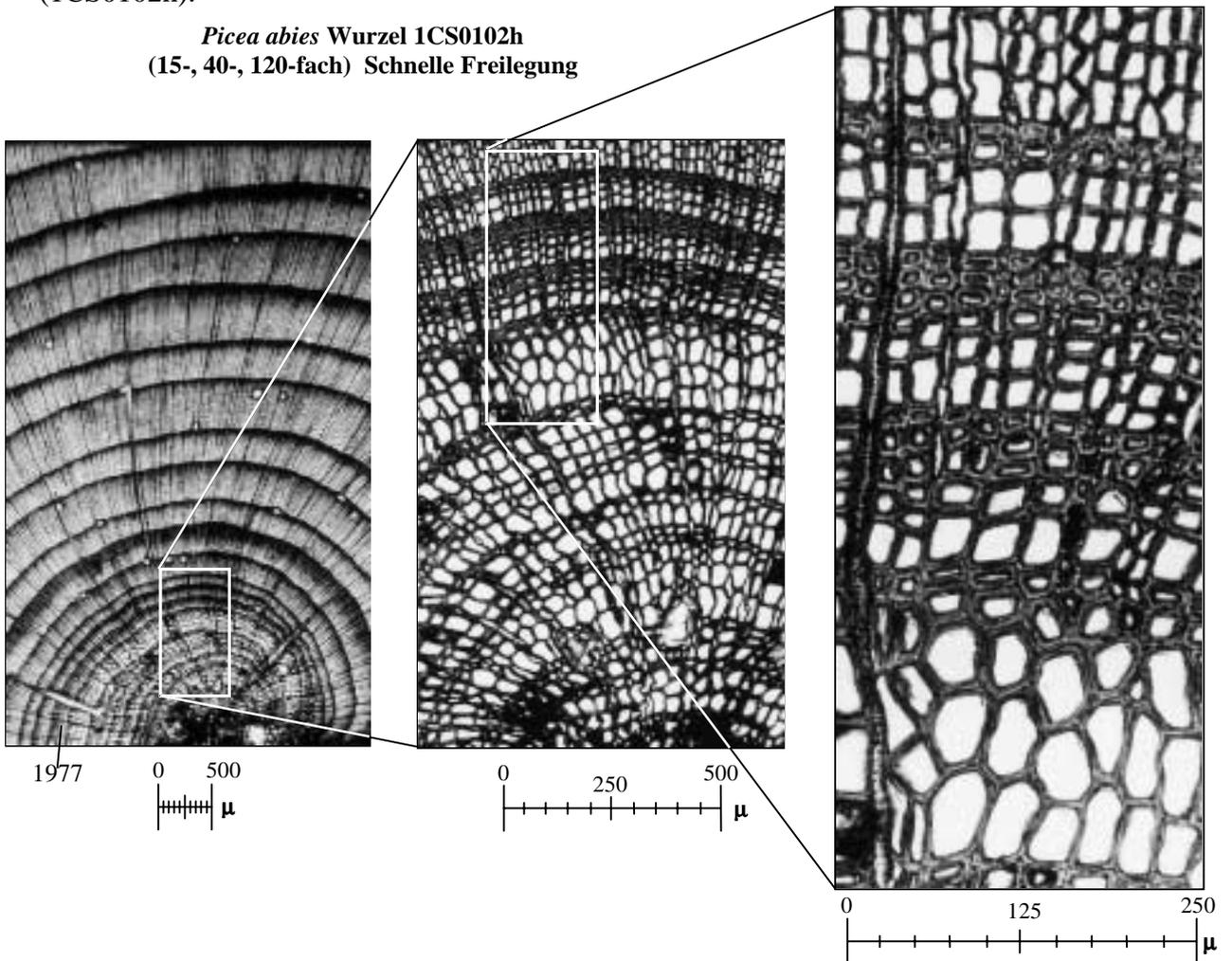


Abb. 39: Dünnschnittaufnahme einer freigelegten *Picea abies* Wurzel (1CS0102h). Die beiden Ausschnittvergrößerungen zeigen die deutliche Reduktion der Größe der Frühholzzellen.

Die in Abbildung 39 dargestellte Probe der *Picea abies* Wurzel (1CS0101h) zeigt im Jahrring 1977 eine plötzliche Reduktion der Größe der Frühholzzellen. Messungen der FH-Zellgrößen bestätigen diesen Eindruck und zeigen deutlich, daß es in den folgenden Jahrringen keine weitere Veränderung der Zellgröße gibt (Abbildung 40).

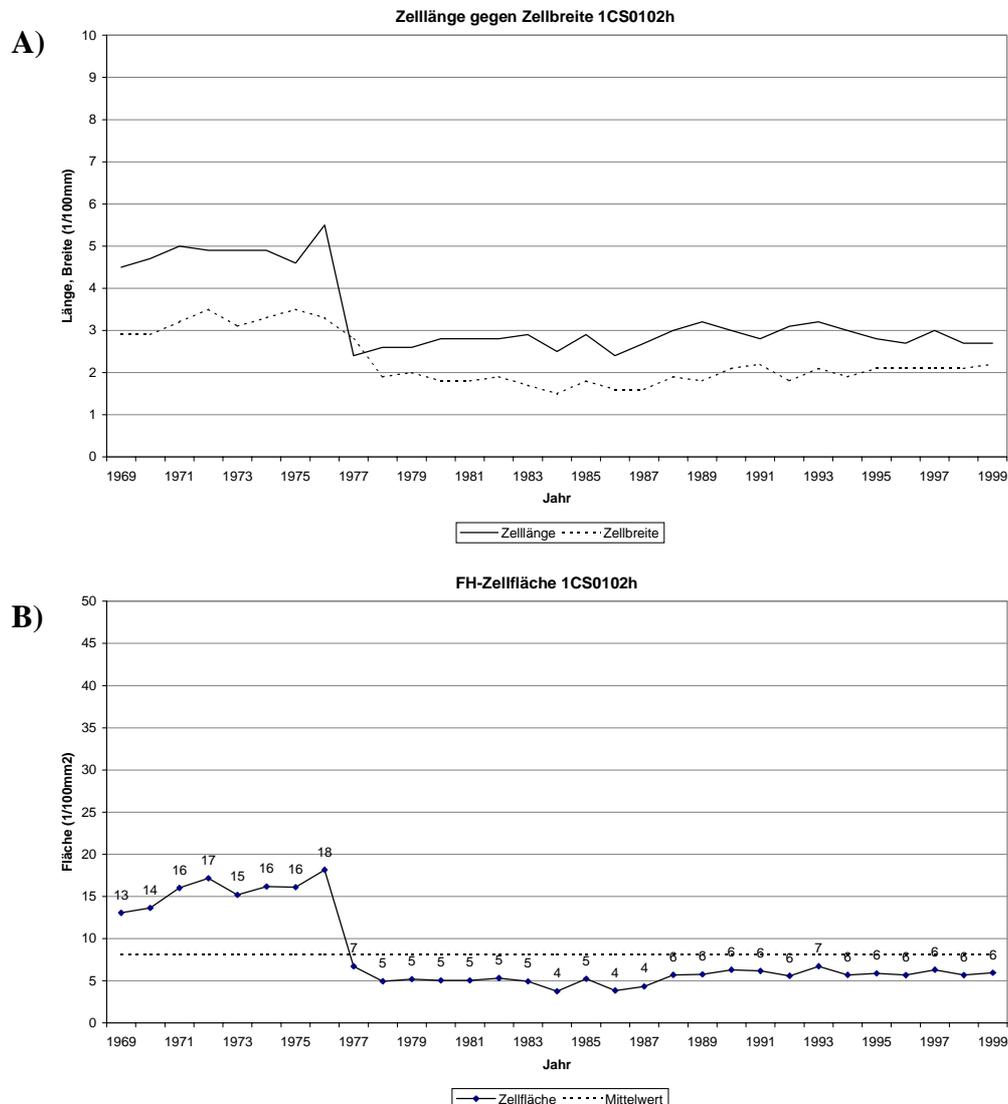


Abb. 40: Diagramme der Messung der Frühholzzellgrößen von *Picea abies* 1CS0102h zeigen eine Reduktion der Zellgrößen ab 1977 um mehr als 50%. A): Darstellung der Länge und Breite der FH-Zellen. B): Darstellung der Reduktion der Zellgröße (Fläche).

Ein anderes Bild zeigt sich bei der Auswertung der *Larix decidua* Probe. Auch hier ist eine Reduktion der FH-Zellgrößen um 50% ab 1977 erkennbar, allerdings erfolgt die Reduktion gleichmäßig über einen längeren Zeitraum (Abbildung 41). Messungen der Zellgrößen wie auch die Auswertung der Graustufen (Abbildung 42) der Dünnschnittaufnahmen bestätigen diesen Eindruck.

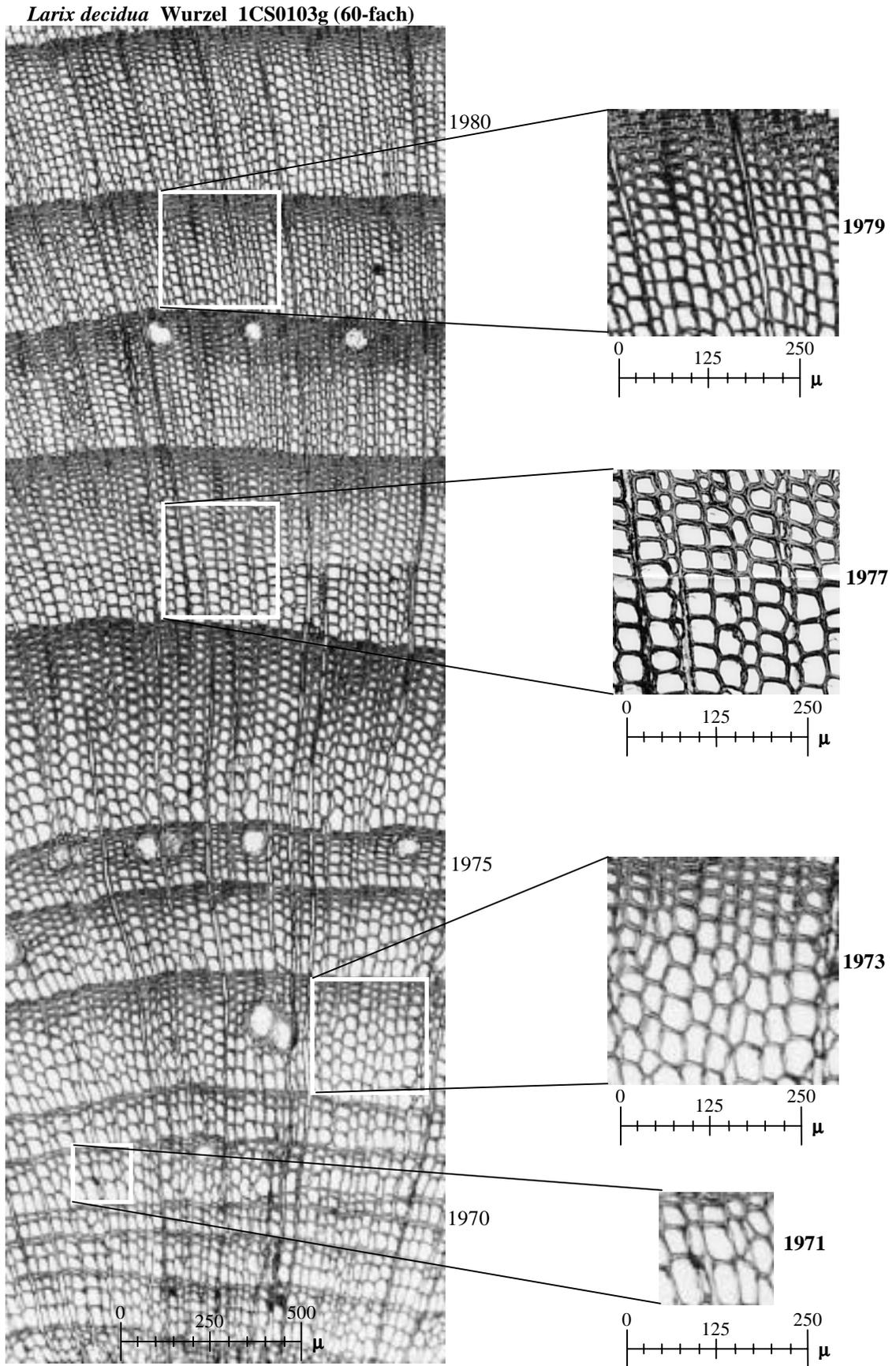


Abb. 41: Dünnschnittaufnahme der *Larix decidua* Wurzel 1CS0103g. Erkennbar ist eine Reduktion der Größe der Frühholzzellen im Jahrring 1977. Der optische Eindruck läßt auch eine gleichmäßige Reduktion zwischen 1975 und 1977 schließen.

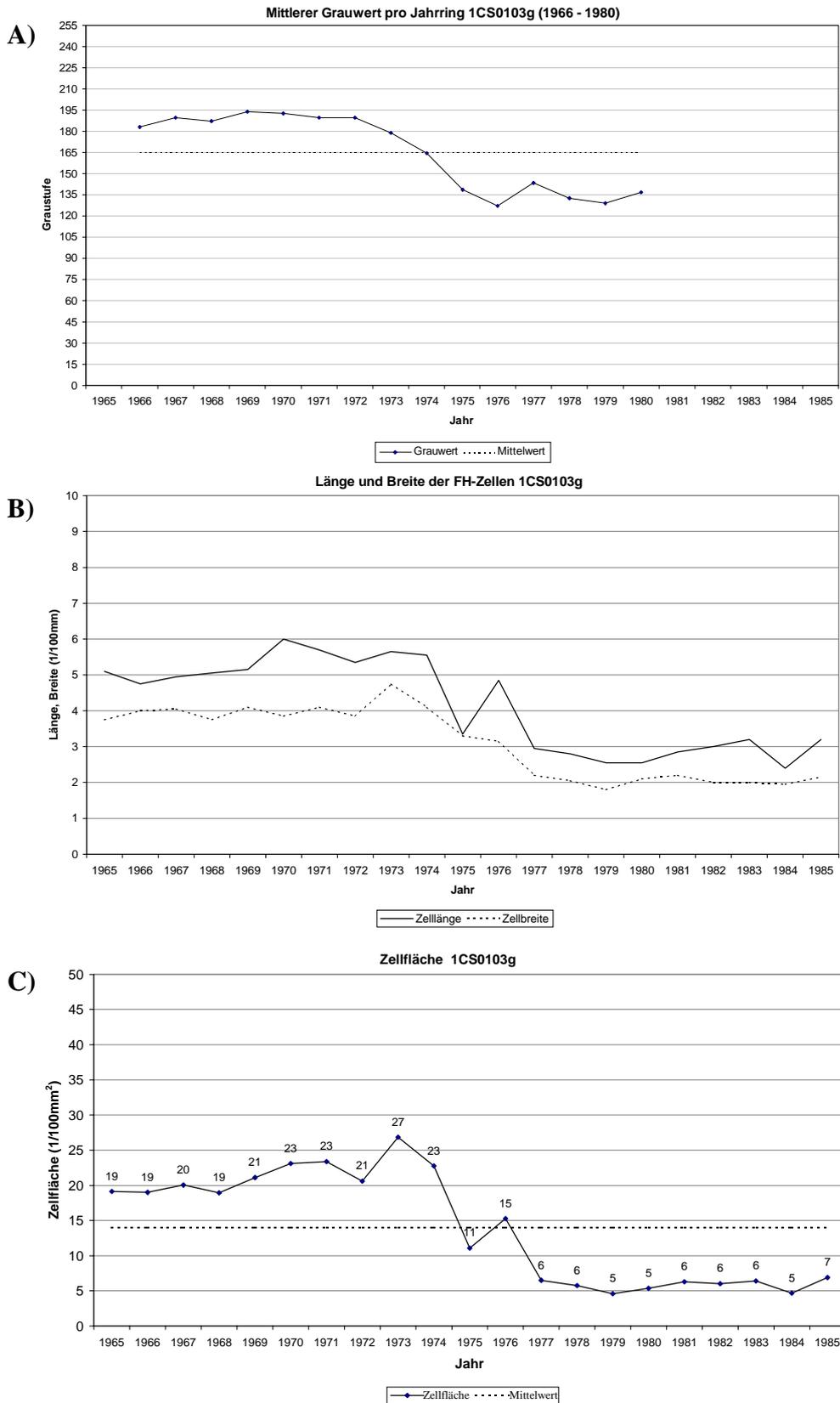


Abb. 42: Diagramme der Graustufenanalyse (A) wie auch der Zellgrößenmessung (B: Längen und Breitenwerte, C: Zellflächen). Die Größenmessungen zeigen eine kontinuierliche Reduktion 1975 bis 1977. Ebenso, wenn auch weniger deutlich, die jährliche Graustufenanalyse.

Die Auswertungen zeigen, daß beide Wurzeln 1977 freigelegt wurden. Die leicht unterschiedlichen Positionen (um 2cm tiefere Lage der Oberseite der *Picea abies* Wurzel) wie auch die unterschiedlichen Ausprägungen der Zellgrößenveränderungen lassen aber darauf schließen, daß zumindest bis zum Ende der Vegetationsperiode 1976 ein kontinuierlicher Abtrag vorherrschte. Vor Beginn des Wurzelwachstums 1977 muß allerdings ein größerer Abtrag erfolgt sein, da die tiefergelegene *Picea abies* Wurzel erst zu diesem Zeitpunkt eine starke Reduktion der Zellgrößen zeigt. Eine genaue Rekonstruktion der Mächtigkeit der Bodenüberdeckung der *Picea abies* Wurzel vor der Freilegung ist im Detail nicht möglich, da die Oberflächenvariationen in dieser Skale zu variabel sind. Bei einer horizontalen Distanz der Probenahmestellen von 10cm kann die Bodenaufgabe durchaus um einige Zentimeter variieren. Allerdings muß die *Picea abies* Wurzel zum Zeitpunkt der beginnenden Freilegung der *Larix decidua* Wurzel noch vollkommen mit Material bedeckt gewesen sein.

Die Dünnschnittauswertungen freigelegter *Pinus cembra* Wurzeln haben gezeigt, daß trotz der geringeren Variationen der Spätholzausprägung nicht freigelegter Wurzeln die Reaktion auf eine Freilegung derjenigen von *Picea abies* und *Larix decidua* entspricht. Ein Beispiel für eine schnelle Freilegung einer *Pinus cembra* Wurzel (HCH0202f) zeigt Abbildung 43. die Probe wurde an der Böschung eines Wanderweges zum „Hungerlitalli“ oberhalb der Siedlung Gruben im Turtmantal (1860m NN) entnommen. Die Distanz zum Stamm betrug 2,5 Meter. Die Oberkante der Böschung war deutlich (15cm) überhängend. Der Winkel zwischen dem Außenrand der Böschungsoberkante und dem Rand des Wanderweges betrug 76° (Höhe 80cm), weshalb auf ein Verstäurzen der durch den Weganschnitt übersteilten Böschung geschlossen werden kann.

Die Auswertung der Wachstumsreaktionen der Probe (1CH0202f) stützt diese Theorie. Der Jahrring 1974 zeigt eine deutliche Reduktion der Größe der Frühholzzellen. Auch hier stimmen die im Gelände ermittelte Art der Freilegung mit den speziellen Wuchsveränderungen im Frühholz der Wurzeln überein.

Abbildung 43 zeigt neben der Darstellung der Wurzelstruktur im Dünnschnitt eine Gegenüberstellung der Veränderung der Zellgrößen im Frühholz und der Variationen der Jahrringbreiten, deren Anstieg im Zusammenhang mit einer Veränderung der Jahrringstruktur bisher als Zeichen der Freilegung angesehen wurde (CARRARA & CARROLL 1979, FAYLE 1968) (vergleiche Kapitel 5.3).

*Pinus cembra* Wurzel  
(1CH0202f, 30-fach)

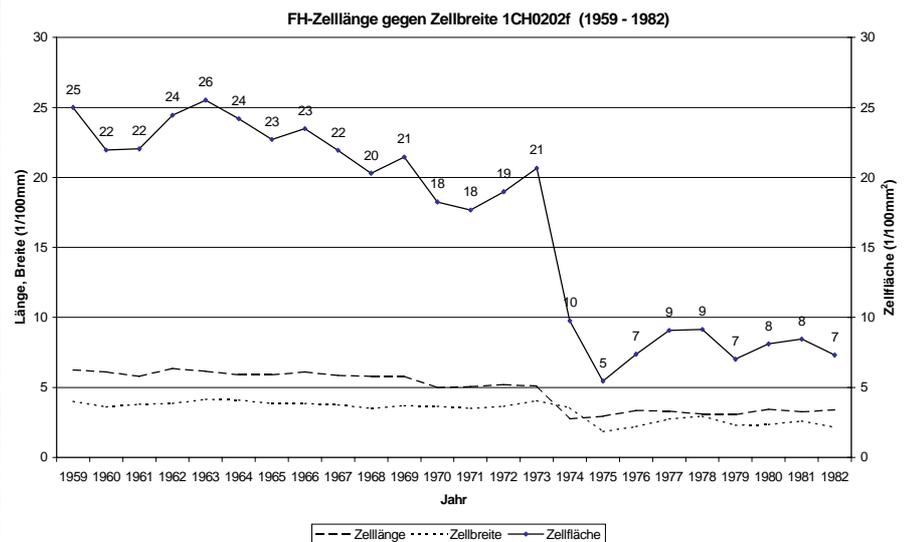
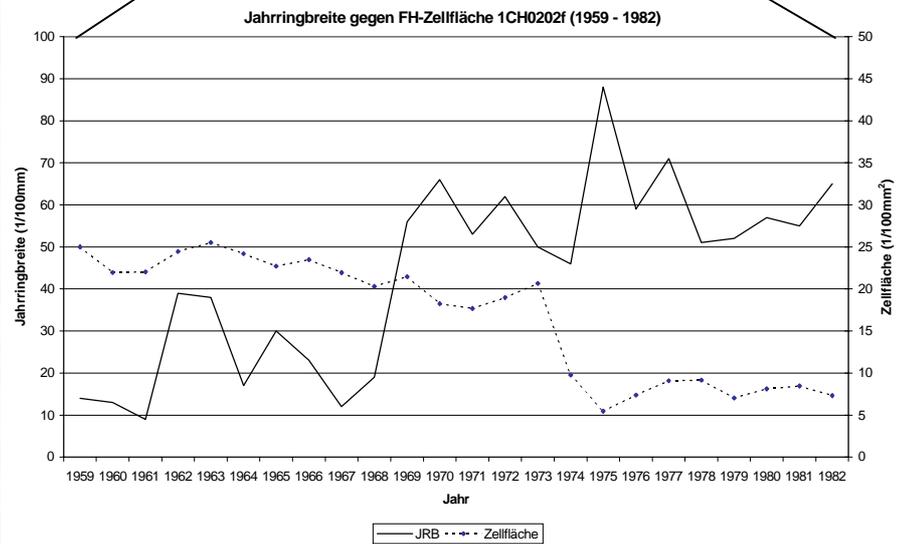
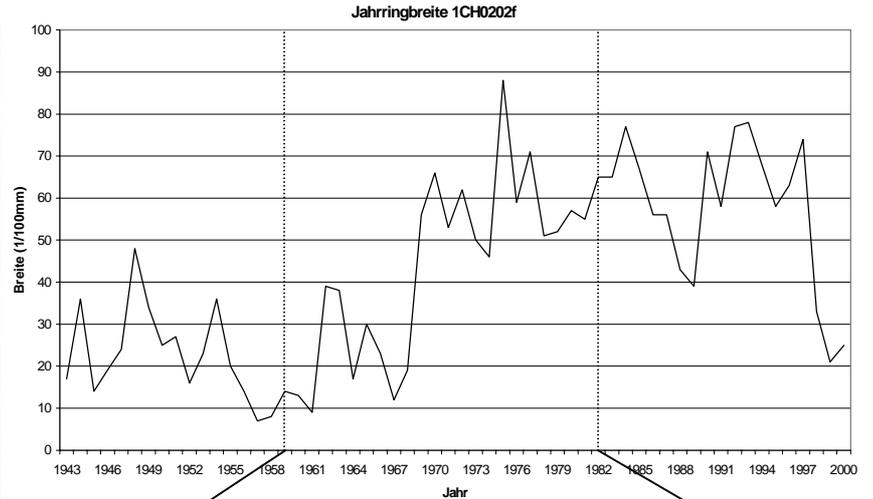
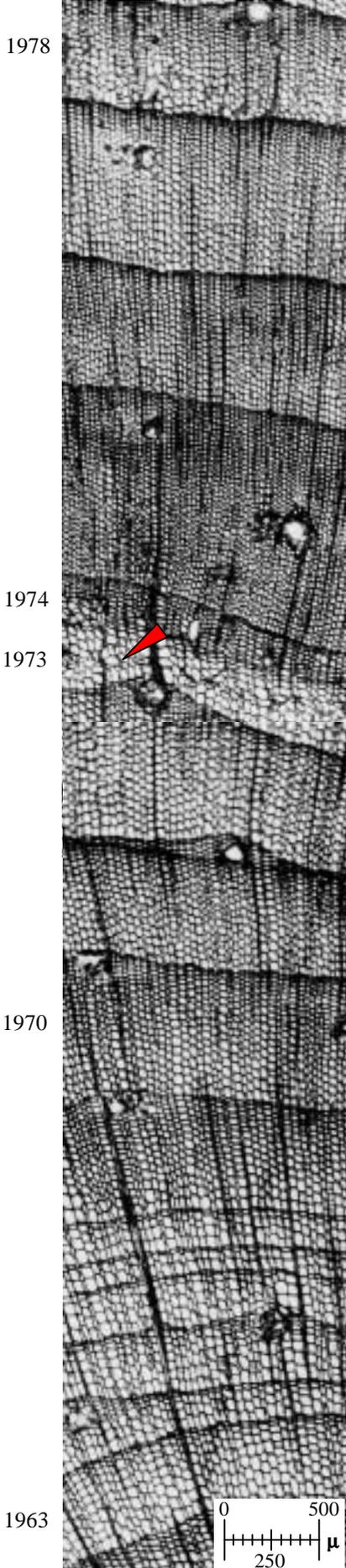


Abb. 43: Dünnschnitt der *Pinus cembra* Probe (1CH0202f) und Diagramme der Jahrringbreitenvariationen (oben), der Zellgrößenveränderungen (unten) sowie einem Vergleich Jahrringbreiten und Zellgrößenveränderungen (mitte). Der rote Pfeil markiert kallusartige Zellen, die hier den Übergang zu einer Harztasche markieren.

Ein Vergleich des visuellen Eindrucks der Frühholzzellen des Dünnschnittpräparates mit der entsprechenden Zellgrößenmessung bestätigt eine starke Reduktion der FH-Zellgrößen 1974. Allerdings erscheinen die Jahrringe ab 1969 bereits wesentlich dunkler. Dies wird durch die gleichmäßig abnehmende Zellgröße zwischen den Jahren 1962 und 1972 gestützt. Die maximale Größenreduktion liegt in diesem Bereich aber bei nur 20%, 1974 wie auch in den Folgejahren ist die Zellgröße um mehr als 50% reduziert. bei genauer Betrachtung wird deutlich, daß die Zellgrößenreduktion der Jahre, die optisch dunkler erscheinen von einer Zunahme der Zellwandstärke begleitet wird. Es scheint sich hierbei um eine Reaktion auf eine zunehmende mechanische Belastung zu handeln.

Die Druckbelastung, die auch 1975 zu erkennen ist, führt neben der stärkeren Ausbildung der Zellwände auch zu einer Zellgrößenreduktion. Diese erreicht aber nicht das Niveau der Größenreduktion einer Freilegung. Der Größenwert der FH-Zellen des Jahres 1975 zeigt, daß eine Druckbelastung auch bei den bereits in der Größe reduzierten Zellen der freigelegten Wurzel eine negative Auswirkung hat.

Der Jahrring 1973 zeigt eine deutliche Störung der Zellstruktur (roter Pfeil in Abbildung 43). Dieses Gewebe markiert hier den Übergang zu einer Harztasche, die sich direkt am linken Rand an die Dünnschnittaufnahme anschließt. Der Freilegung scheint also eine massive Störung vorausgegangen zu sein. Eine anthropogene Einwirkung, etwa durch Arbeiten am Weg, ist hierbei nicht auszuschließen.

Die folgenden Beispiele für schnelle (Abbildung 45) wie auch für kontinuierliche Freilegung (Abbildung 48) werden die exemplarische Darstellung eindeutiger Freilegungsreaktionen abschließen.

An der Murrinne des Ritigrabe bei Grächen wurden freigelegte und nicht freigelegte (vergleiche Abbildung 19) Wurzeln einer Lärche entnommen, die am Rand eines alten Levées aufwuchs und an dessen Stammfuß mehrere Blöcke einer alten Murablagerung (Levééspur) angelagert sind. Der Standort befindet sich auf 1540m NN, zwei Meter oberhalb der Straßenbrücke Rittinen – Gasenried. Die beprobte freigelegte Wurzel wuchs hangparallel am oberen Rand der aktuellen, orographisch rechten Gerinnecke. Die Distanz der freigelegten Probe (0CR0101f) zur Oberfläche betrug 12cm, die Entnahmedistanz zum Stamm 2,3m. die Art der Freilegung ist hier nicht ganz

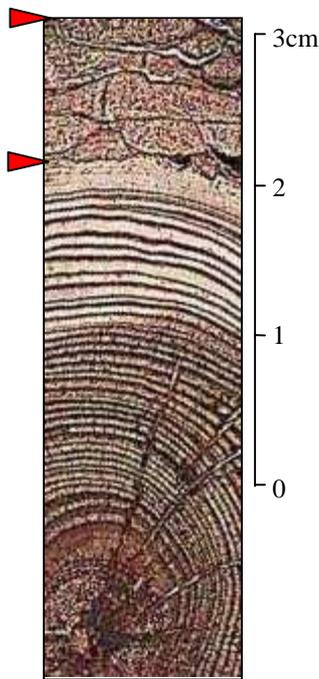


Abb. 44: Ausschnitt des Scanbildes der *Larix decidua* Wurzelscheibe 0CR0101f. Die Pfeile markieren die starke Ausprägung der Borke

Eindeutig zu bestimmen. Wahrscheinlich ist eine Freilegung durch einen Murschub, dessen Spuren am Stammfuß der Lärche zu finden sind. Eine Beeinflussung durch den Brückenbau ist aber nicht völlig auszuschließen. Die Stärke der um die Wurzel ausgebildeten Borke (Abbildung 44) legt die Vermutung nahe, daß die Freilegung schon sehr lange zurück liegt. Aus der Wurzel wurde ein 80cm langes Stück entnommen, von dem 30cm nicht freigelegt waren. Neben der in Abbildung 45 dargestellten freigelegten Probe wurde auch eine Probe aus dem nicht freigelegten Teil der Wurzel entnommen (Abbildung 46). Der entsprechende Querschnitt befand sich genau 2cm nach dem Übergang der Wurzel im Substrat. Der Abstand der beiden Proben zueinander beträgt 40cm.

Die freigelegte Probe zeigt eine starke Reduktion der FH-Zellgröße 1956 und 1957. Die Jahrringgrenze zwischen 1955 und 1956 ist durch eine Störung des Zellgefüges beeinflusst (Pfeil in Abbildung 46), vergleichbar mit 1954. Diese Störung wie auch die schnelle Reduktion der Zellgröße läßt auf eine Erschütterung durch einen Murschub schließen. Ein Abrutschen des Substrates durch ein Unterschneiden bei Bauarbeiten an der Brücke hätte keine derartige Störung der Zellreihen bewirkt.

*Larix decidua* Wurzel  
OCR0101f (40-fach)

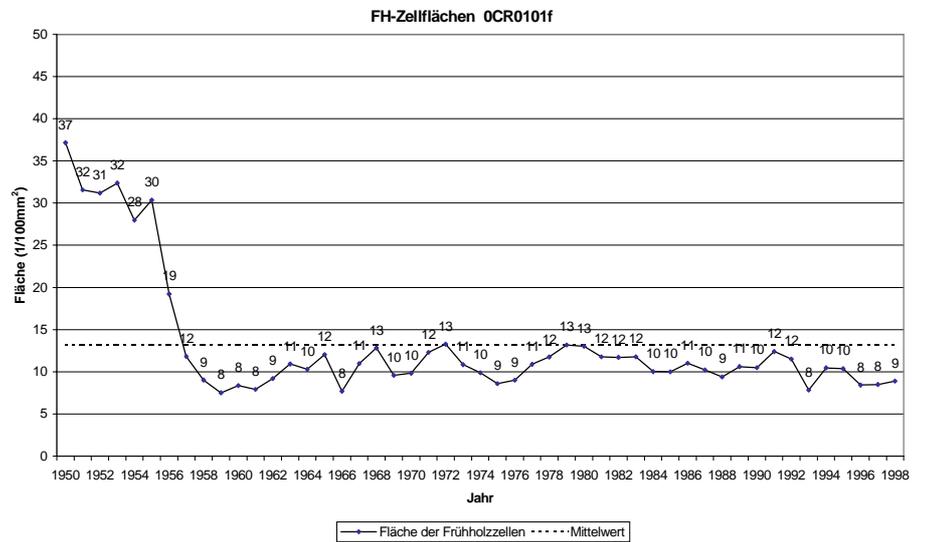
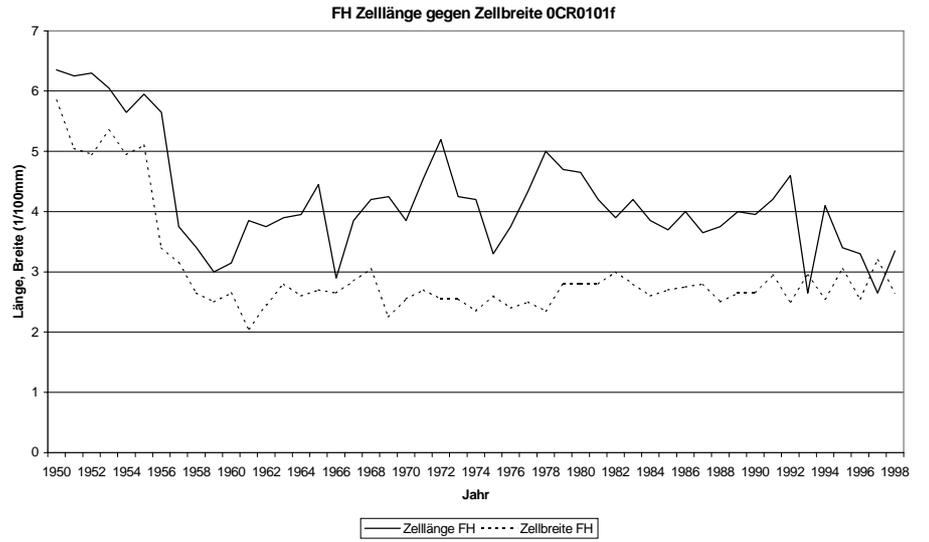
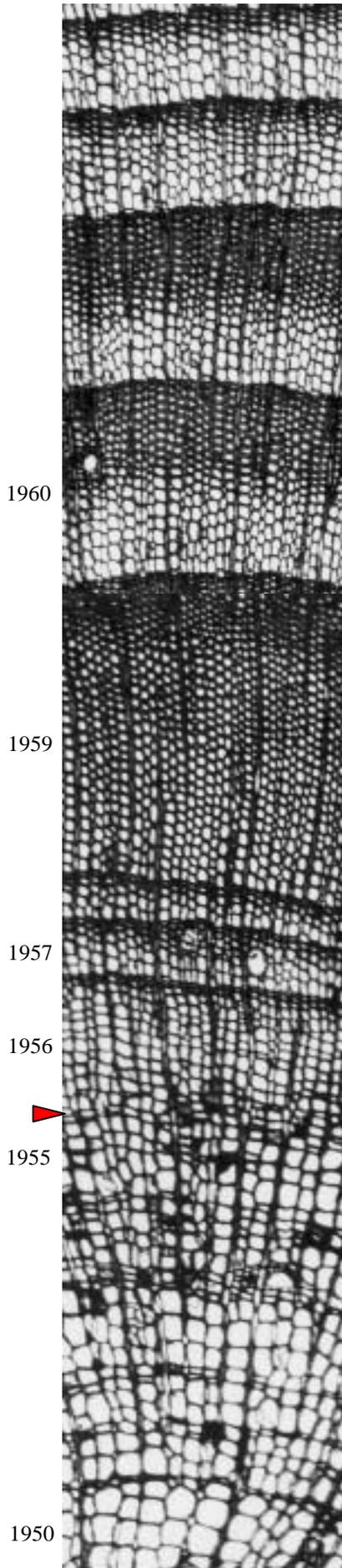
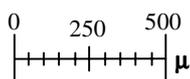
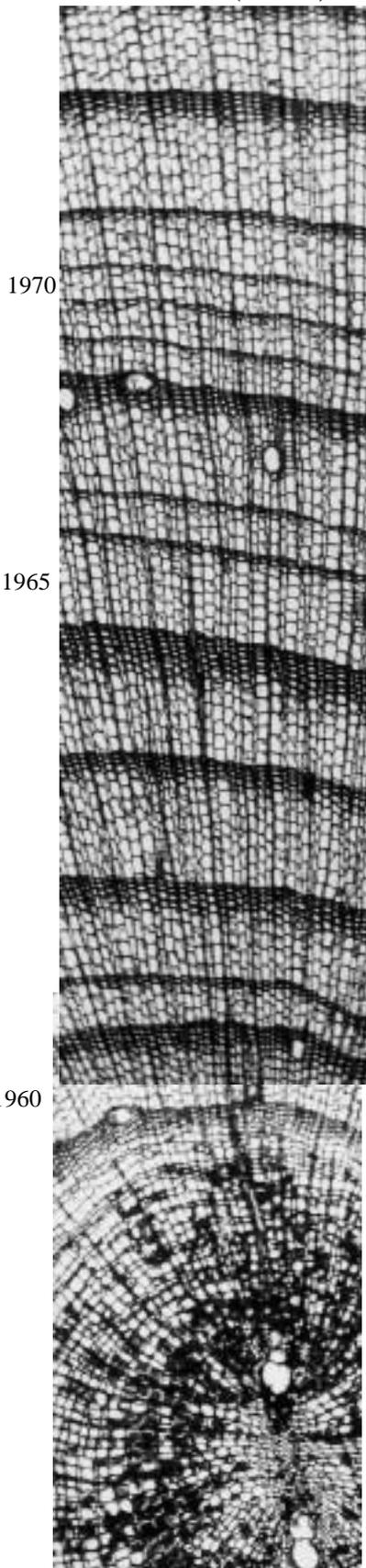


Abb. 45: Dünnschnittaufnahme der freigelegten *Larix decidua* Probe OCR0101f. Die Diagramme der FH-Zellgrößenreduktion wie auch die Störung an der Jahrringgrenze 1955 / 1956 (Pfeil) lassen auf eine Freilegung vor Beginn der Vegetationsperiode 1956 schließen



*Larix decidua* Wurzel  
1CR0101f (30-fach)



1970

1965

1960

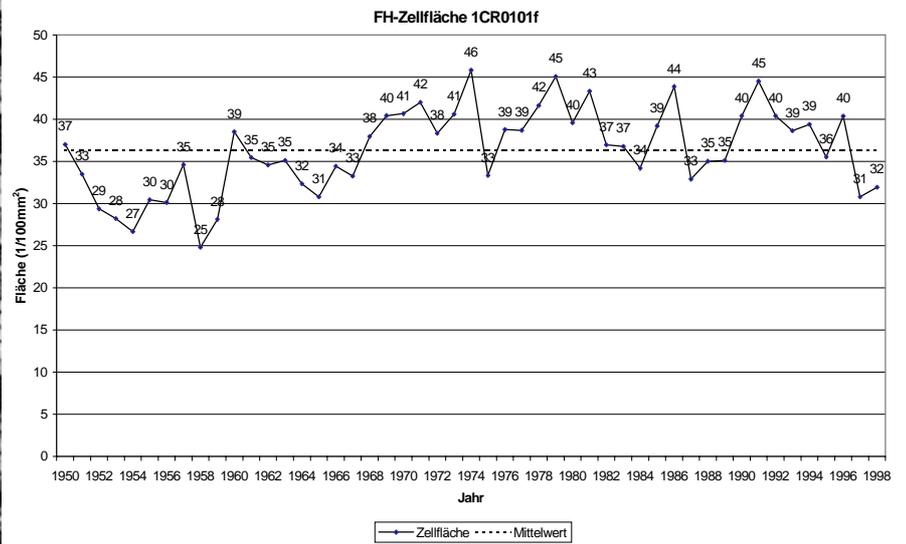
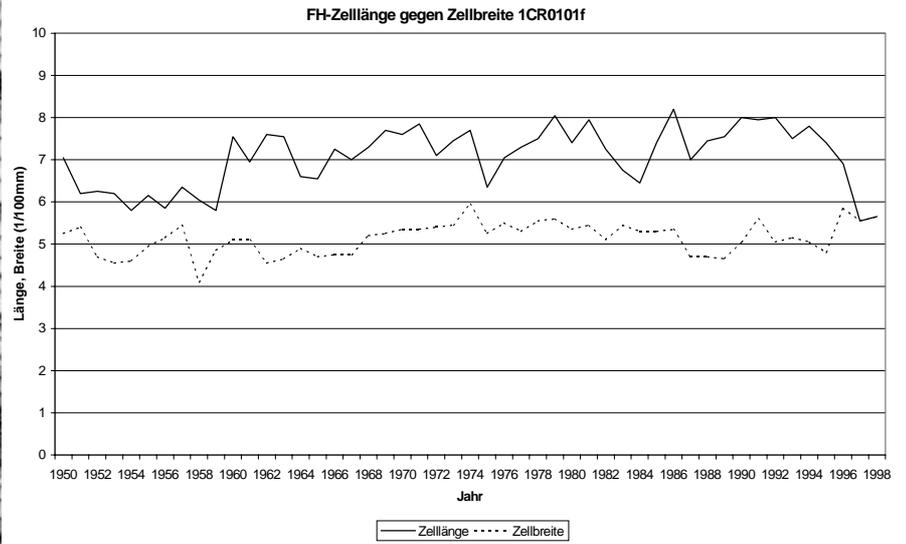
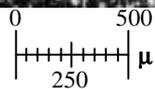


Abb. 46: Dünnschnittaufnahme der nicht freigelegten *Larix decidua* Probe 1CR0101f. Abstand zu 0CR0101f = 40cm, Lage: 2cm nach dem Übergang der Wurzel in das Substrat. Die Diagramme der Zellgrößen zeigen keinen Hinweis auf eine Beeinflussung durch die Freilegung.

Die nicht freigelegte Probe 1CR0101f zeigt bis 1955 annähernd die gleichen Zellgrößenwerte wie die freigelegte Probe 0CR0101f. Im Gegensatz zur dieser ist ab dem Jahr 1956 eher ein leicht ansteigender Trend in der Größe der Frühholzzellen festzustellen (Abbildung 47).

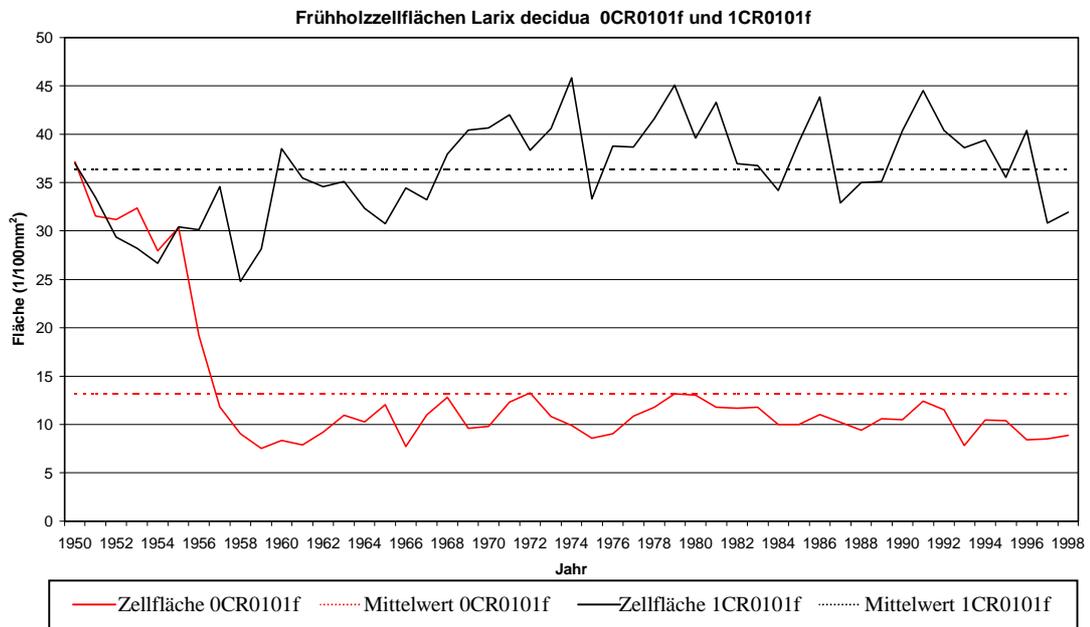


Abb. 47: Gegenüberstellung der Zellgrößenveränderungen im Frühholz der freigelegten (0CR0101f) und der nicht freigelegten (1CR0101f) *Larix decidua* Probe des Standortes Ritigrabe.

Der Vergleich der Zellgrößenveränderungen im Frühholz der beiden Proben zeigt, daß die nicht freigelegte Probe keine Anzeichen einer Freilegung zeigt, obwohl sie nur 2cm nach dem Übergang der Wurzel in das Substrat entnommen wurde. Die sehr ähnlichen Zellgrößenwerte bis zum Jahr 1956 und die anschließend auftretende Differenz zeigen neben dem Zeitpunkt der Freilegung auch, daß sich die Merkmale der Veränderung auf die freigelegten Bereiche der Wurzel beschränken (siehe Kapitel 5.3).

Die in Abbildung 48 dargestellte Probe einer *Larix decidua* Wurzel wurde dem Wurzelsystem einer Lärche entnommen, die 1999 durch eine Lawine aus dem Bereich des Brändjätälli (Turtmantal) entwurzelt wurde.

*Larix decidua* Wurzel  
0CL0101h (15-fach)

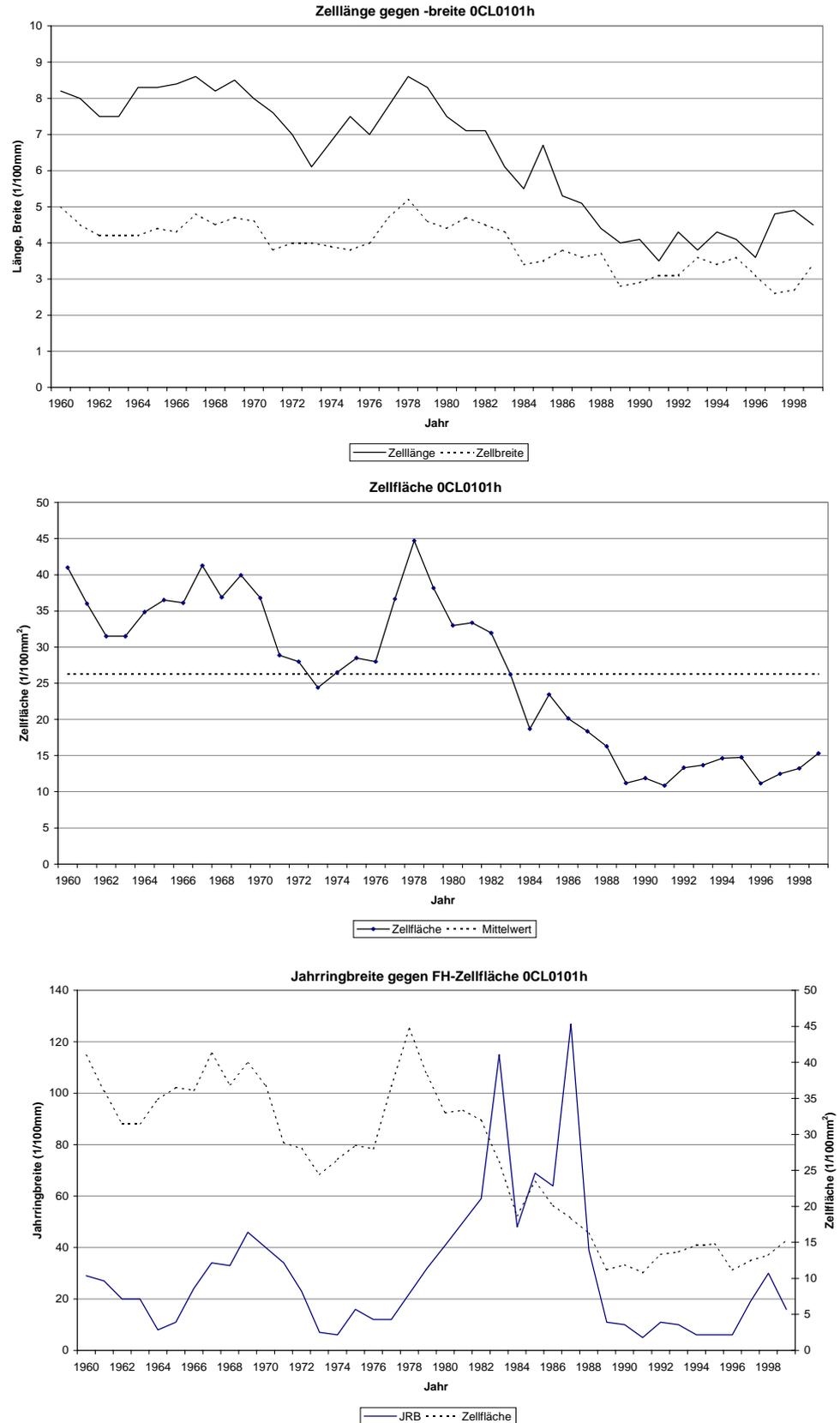
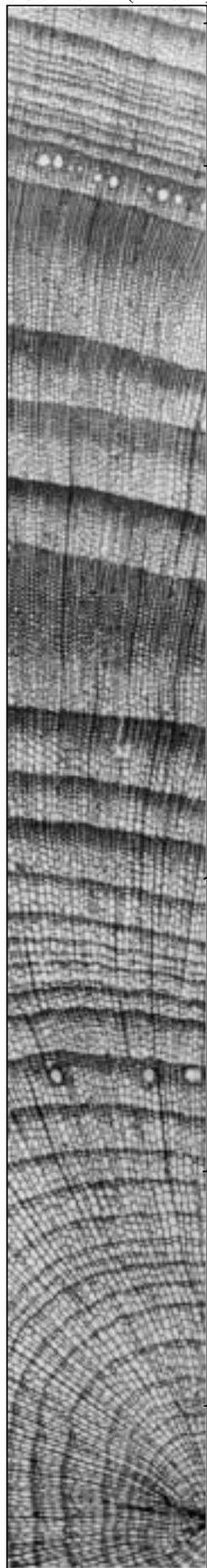


Abb. 48: Dünnschnitt der *Larix decidua* Wurzel 0CL0101h. Die Diagramme zeigen die Entwicklung der FH-Zellgrößen (oben, mitte) wie auch einen Vergleich der Zellflächenveränderung mit dem Verlauf der Jahrringbreiten. Die Zellgrößen zeigen eine beginnende Freilegung 1971-1976, erneute Übersättigung und anschließende kontinuierliche Freilegung 1983-1989.

Bei der Wurzel handelt es sich um eine Sekundärwurzel, die in ihrem Verlauf einen nahezu rechten Winkel zum Stamm bildete. Bei dem Standort handelt es sich um einen durch Lawinenereignisse überprägten Murkegel auf 1850m NN. Die entnommene Wurzel zeigte in einem Bereich ca. 90cm vom Stammansatz eine etwas stärker ausgeprägte Borke. Hierbei könnte es sich um das Anzeichen einer Freilegung handeln. Die Auswertung der Zellgrößenvariationen im Frühholz eines entnommenen Querschnittes bestätigt diese Vermutung. Die Variationen im Verlauf der Zellgrößenentwicklung deuten jedoch auf einige Störungen hin. Auffallend ist zunächst die Reduktion der Zellgrößen zwischen 1982 und 1989, die auf eine Freilegung der Wurzel schließen läßt.

Der Vergleich der Zellgrößenentwicklung mit der Zellstruktur im Dünnschnitt zeigt jedoch eine Zellgrößenreduktion zwischen 1970 und 1976 die von einer unterschiedlichen Ausprägung der Jahrringstruktur begleitet wird. Ab 1970 ist eine deutlich ausgebildete Spätholzzone zu erkennen, die ab 1975 nicht mehr ausgeprägt ist und erst ab 1978 wieder gleichmäßig stärker wird. Die maximale Zellgrößenreduktion dieser Phase zeigt sich 1973. Der Jahrring 1972 zeigt im Spätholz traumatische Harzkanäle, die auf eine Störung hindeuten. Das späte Auftreten der Harzkanäle schließt die Einwirkung einer Lawine aus.

Wenn auch die Zellgrößenreduktion dieser Phase nicht die 50% Grenze erreicht, die bei allen freigelegten Wurzeln festgestellt wurde, deutet die Ausprägung der Reduktion auf eine beginnende Freilegung hin, die 1977 durch eine mögliche Überdeckung mit Lockermaterial unterbrochen wurde, 1982 wieder einsetzte und 1989 zur entgültigen Freilegung führte. Auch hier ist im vorausgegangenen Jahr 1988 eine Reihe traumatischer Harzkanäle ausgebildet, die auf eine Störung hinweisen.

Die Entwicklung der Jahrringbreite ist zwischen 1980 und 1988 deutlich durch unterschiedliche mechanische Beanspruchungen beeinflusst. Nach der Störung 1988 ist die Breitenentwicklung deutlich unterdrückt. Der genaue Grund für diese Zuwachsreduktion ist nicht festzustellen. Allerdings zeigte auch der Stamm ab 1989 ein deutlich reduziertes Wachstum.

### 5.3 Diagnostische Merkmale

Die in Kapitel 5.1 und 5.2 aufgeführten Beispiele der Wurzelbewertungen stehen stellvertretend für die Auswertung aller Wurzeln, die im Rahmen dieser Arbeit analysiert wurden. Die in den einführenden Kapiteln präsentierten bisherigen Informationen über die hohe Variabilität der Jahrringausprägung der Wurzeln wird durchaus bestätigt. Der hier verwendete Ansatz der Standort- und Probenauswahl wie auch der kombinatorischen Auswertung der Zellstrukturen zeigt jedoch ein Merkmal, das ausschließlich in freigelegten Wurzeln zu finden ist. Die Reduktion der Größe der Frühholzzellen um 50% und mehr.

Alle bisherigen Arbeiten konzentrierten sich bei der Auswertung auf die Entwicklung der Jahrringausprägung und die der Zellen im Verlauf der Wurzel. Dabei ging man davon aus, daß mit zunehmendem Abstand zum Stamm dessen Einfluß abnimmt und versuchte auf dieser Grundlage regelhafte Strukturen für nicht freigelegte Wurzeln zu finden (BANNAN 1941, FAYLE 1968, GLOCK et al. 1937, KRAUSE & ECKSTEIN 1993, OMEIS 1895). Obwohl der Einfluß der direkten Wurzelumgebung auf die Entwicklung der Wurzeln seit langem bekannt ist (WIELER 1891), wurden die strukturellen Merkmale immer auf die Stammentfernung der Probe und unterschiedliche mechanische Einflüsse bezogen. Die genaue Tiefenlage einzelner Wurzelproben wurde aber nie berücksichtigt.

Der Tatsache, daß Wurzeln aufgrund ihrer Funktion und des allgemeinen Stoffaustausches durch das Wachstum des Stammes, genauer gesagt des gesamten oberirdischen Anteils eines Baumes beeinflußt werden, wird hier nicht widersprochen. Auch der Einfluß mechanischer Belastungen auf die Wurzelentwicklung ist unbestritten. Deshalb wurden alle Proben in einem Mindestabstand von ca. 1m vom Stammansatz entnommen um einen direkten Einfluß möglicher Stambewegungen (z.B. durch Wind) zu minimieren.

Es hat sich jedoch gezeigt, daß weniger der Abstand zum Stamm als vielmehr die Tiefenlage die Ausprägung der Wurzelstrukturen beeinflußt. Dieses Kriterium zeigt erstmals einheitlich verifizierbare Strukturen der Wurzelausprägung selbst bei verschiedenen Baumarten. Wurzelproben, die in unterschiedlichen Entfernungen zum Stammansatz aber in gleicher Bodentiefe entnommen wurden, zeigen eindeutig vergleichbare Strukturen. Eine stammähnliche Ausprägung, die häufig mit einem Anstieg der Jahrringbreite in Verbindung gesetzt wird, kann nicht länger als Kriterium für eine Freilegung herangezogen werden.

Dies wird nachfolgend in Ergänzung der in Kapitel 5.1 vorgestellten Strukturausprägung im Dünnschnitt an einem Beispiel der Jahrringbreitenentwicklung einer freigelegten Wurzeln aus Kapitel 5.2 belegt.

Abbildung 49 zeigt die Jahrringbreite und die entsprechende durchschnittliche Anzahl der radialen Zellreihen des Frühholz- und Spätholzanteils der durch kontinuierliche Abtragsprozesse 1977 (Reduktion der Frühholzzellgröße 1975 – 1977 um 50%) freigelegten *Larix decidua* Probe 1CS0103g (vergleiche Abbildung 41 und 42).

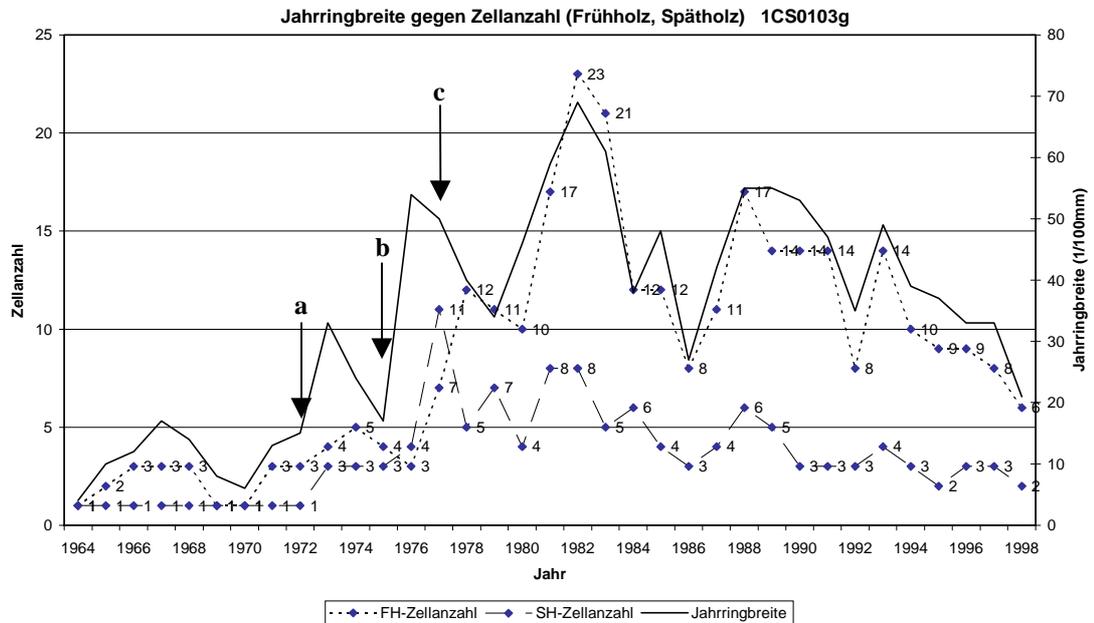


Abb. 49: Diagramm der Jahrringbreitenentwicklung einer durch kontinuierliche Abtragsprozesse 1977 freigelegten *Larix decidua* Wurzel unter Angabe der radialen Anzahl der Zellreihen im Frühholz (FH-Zellanzahl) und Spätholz (SH-Zellanzahl). **a**: Letzter Jahrring mit undeutlich ausgebildeten Spätholzzellen und der Dominanz der Frühholzzellen bei der Jahrringbreite (vergleiche Abbildung 41). **b**: Traumatische Harzkanäle führen zu einer Reduktion der Jahrringbreite bei gleichbleibender Zellanzahl. **c**: Zeitpunkt der Freilegung durch die Auswertung der Frühholzzellgröße.

Betrachtet man zunächst nur die Jahrringbreite, so ist ein kontinuierlicher Anstieg bis 1982 mit nachfolgend negativer Tendenz zu erkennen. Die Einbeziehung der Zellreihen (Zellanzahl) erlaubt einen detaillierteren Blick auf die Strukturentwicklung. Bis 1972 wird die Jahrringbreite ausschließlich durch die Anzahl der Frühholzzellen gesteuert (**a**). 1973 steigt die Anzahl der Spätholzzellen. Der Übergang zwischen Frühholz und Spätholz ist durch druckholzzähnliche Zellen geprägt. Dies ist begleitet von einer deutlicheren Ausprägung des Spätholzes (Zunahme der Zellwandstärke) und damit einem eher stammähnlichen Eindruck (vergleiche Dünnschnitt in Abbildung 41). Das Auftreten traumatischer Harzkanäle 1975 (Abbildung 41) bewirkt einen Einbruch der Jahrringbreite bei nahezu gleichbleibender Anzahl der Frühholzzellen (**b**). Dies ist auf die Reduktion der Zelllängen im Frühholz zurückzuführen.

Zum Zeitpunkt der Freilegung ist ein deutlicher Anstieg der Anzahl der Frühholz- wie auch der Spätholzzellen zu erkennen (**c**), der allerdings eher durch das verstärkte

Auftreten von Druckholzzellen und der daraus resultierenden Unsicherheit der Abgrenzung der Spätholzzellen in diesem Jahr zu begründen ist.

Nach den bisherigen Kriterien müßte man den Zeitpunkt der Freilegung auf 1973 festlegen, da hier eine stammähnliche Ausprägung wie auch das Auftreten druckholzähnlicher Strukturen gegeben ist. Dieses bewußt ausgewählte Beispiel einer geringen Differenz der Ergebnisse der beiden Auswertungsarten soll bereits hier auf die präzisen Möglichkeiten der Abtragsrekonstruktion auch über geringe Zeiträume hinweg hinweisen.

Folgt man den Ergebnissen von FAYLE (1968), lassen sich Wachstumsveränderungen freigelegter Wurzeln noch bis zu einer Distanz von einem Meter entlang der im Substrat verbliebenen Wurzel nachweisen. Bezüglich der Größenreduktion der Frühholzzellen in Folge einer Freilegung konnte diese Aussage nicht bestätigt werden. Bereits 2cm nach dem Übergang einer teilweise freigelegten Wurzel in das Substrat ist diese Reaktion nicht mehr festzustellen (vergleiche die Auswertung der Probe in Abbildung 46). Dieses Merkmal ist folglich auf den freigelegten Bereich der Wurzel beschränkt.

Alle bisher durch andere Autoren festgelegten Merkmale - dies betrifft auch Schwankungen der Zellgrößen im Durchmesser - verändern sich erst in Abhängigkeit der Tiefenlage entlang der Wurzel.

Für die Bestimmung der Merkmale einer Freilegung bedeutet dies, daß nur die Größenreduktion der Frühholzzellen um 50% und darüber hinaus im direkten Vergleich mit den Zellgrößen der vorausgegangenen Jahre im gleichen Querschnitt als eindeutiges diagnostisches Merkmal der Freilegung selbst herangezogen werden kann.

Betrachtet man jedoch die Jahrringausprägungen nicht freigelegter Wurzeln entsprechend ihrer Tiefenlage, ermöglicht dies die Festlegung diagnostischer Merkmale nicht nur für die Bestimmung des Freilegungszeitpunktes.

Vielmehr wird die Rekonstruktion des Verlaufes der Freilegung einer Wurzel anhand der entsprechenden Merkmale möglich. In Tabelle 5 sind diese diagnostischen Merkmale getrennt nach der Art der Freilegung (schnell oder kontinuierlich) zusammengefaßt. Zusätzlich sind mögliche beeinflussende Faktoren aufgeführt, die nachfolgend in Kapitel 5.4 genauer erörtert werden.

Tabelle 5: Diagnostische Merkmale bei schneller und kontinuierlicher Freilegung von *Larix decidua*, *Picea abies* und *Pinus cembra* Wurzeln.

	Merkmal	Auslösender Faktor
<b>Schnelle Freilegung</b>	<p>Frühholz:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Anstieg der Zellanzahl</li> <li>➤ Reduktion der Zellgröße &gt; 50%</li> </ul> <p>Spätholz:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Anstieg der Zellanzahl</li> <li>➤ Anstieg der Zellwandstärke</li> <li>➤ Reduktion des inneren Zellvolumens</li> </ul> <p>Übergang Spätholz / Frühholz deutlich abgegrenzt ( = Zellstruktur stammähnlich)</p>	<p><b>Einmaliges Erosionsereignis</b></p> <p>Schneller Kontakt mit der freien Atmosphäre</p>
<b>Kontinuierliche Freilegung</b>	<p>-----</p> <p>Anstieg der Zellanzahl im Frühholz Kein / leichter Anstieg der Zellanzahl im Spätholz</p> <p>Anstieg der Zellwandstärke im Spätholz Vereinzelt leichter Anstieg des inneren Zellvolumens im Spätholz</p> <p>Reduktion des inneren Zellvolumens im Spätholz ( = Zellstruktur stammähnlich)</p> <p>Reduktion der Zellgröße im Frühholz, bei entgültiger Freilegung &gt; 50%</p> <p>Anstieg der Zellanzahl im Frühholz</p>	<p><b>Gleichmäßiger Oberflächenabtrag</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Abnehmender Druck</li> <li>• Steigender Einfluß von Temperaturschwankungen</li> </ul> <p>beginnende Freilegung</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontakt mit der freien Atmosphäre</li> </ul>

## 5.4 Einflußfaktoren

Die gewonnenen Erkenntnisse über die strukturellen Veränderungen werfen die Frage nach den beeinflussenden oder auslösenden Faktoren dieser Merkmalsveränderungen auf. Das Hauptaugenmerk wurde dabei bisher auf den Lichteinfluß gerichtet, der den Metabolismus einer Pflanze wesentlich steuert (SITTE et al. 1998). Gerade bei Wurzeln ist der deutlichste Unterschied in den Umgebungsbedingungen nach einer Freilegung darin zu sehen, daß diese, im Gegensatz zu den natürlichen Wuchsbedingungen, dem sichtbaren Licht ausgesetzt sind.

Die in den Kapiteln 5.1 und 5.2 gezeigte Tatsache, daß nicht freigelegte Wurzeln deutliche Strukturunterschiede bei geringer werdender relativer Tiefenlage zeigen, schließt allerdings das Licht als dominant beeinflussenden Faktor für einen Großteil der Strukturveränderungen aus.

Auffallend war zudem, daß die grundlegende durchschnittliche Größe der Frühholzzellen der Wurzeln in verschiedenen Bodentiefen unterschiedlich ausgeprägt ist. Diesbezüglich konnte zwar keine eindeutige Zuordnung getroffen werden, dennoch sind die Zellen tiefwachsender Wurzeln im Durchschnitt größer als diejenigen aus geringeren Bodentiefen.

Eine Veränderung der Druckverhältnisse bei geringerer Tiefenlage ist offensichtlich, da eine geringere Substratmächtigkeit über der Wurzel einen geringeren Auflastdruck nach sich zieht. Im Rahmen der Auswertungen hat sich allerdings gezeigt, daß Wurzeln, die in ihrem Verlauf bei gleicher Tiefenlage in unterschiedlich dichtem Substrat wachsen (z.B. umlagernde Blöcke in sonst lockerem Bodenmaterial) zwar unterschiedliche Zeichen mechanischer Belastung zeigen, eine Veränderung der Jahrringstruktur entsprechend der in Tabelle 5 aufgeführten Merkmale ist aber nicht deutlich zu unterscheiden.

Bezüglich der Feuchteverhältnisse innerhalb der oberen 25cm der Böden, aus denen der Großteil der hier untersuchten Wurzeln entnommen wurde, gibt es sicherlich Unterschiede, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erfaßt werden konnten. Allerdings gibt es große Unterschiede bezüglich der Niederschlagsverteilung wie auch der Substratlagerung zwischen den ausgewählten Standorten, die sich auf die Bodenfeuchte auswirken. Klar zuzuordnende Unterschiede in der Merkmalsausprägung waren diesbezüglich aber nicht festzustellen.

Bezüglich der Reaktionen bei der entgeltigen Freilegung einer Wurzel erscheinen diese Parameter als deutliche Einflußfaktoren nicht relevant. Selbst bei geringer Substratüberdeckung von nur einem Zentimeter sind keine Anzeichen für eine Freilegung zu erkennen. Eine nachfolgende Druckveränderung bei beginnender Freilegung oder eine deutliche Veränderung der Feuchteverhältnisse ist nicht wahrscheinlich.

Ein Einflußfaktor, der deutliche Unterschiede im Bereich der oberen 20cm des Bodens aufzeigt und auch nach der Freilegung auf die Wurzel einwirkt, ist die Temperatur.

Wie bereits in Kapitel 2.4.1.5 ausgeführt (siehe Abbildung 9) gibt es in diesem Bereich des Bodens deutliche Unterschiede in der Auswirkung täglicher Temperaturschwankungen. Am deutlichsten sind diese Schwankungen im Allgemeinen in den oberen 10cm des Bodens ausgeprägt. Wird die Wurzel freigelegt, ist sie diesen Temperaturschwankungen ohne Pufferung direkt ausgesetzt. Bei einer Verringerung der Tiefenlage einer Wurzel durch Bodenabtrag wird auch die direkte Temperaturbeeinflussung verändert. Es ist also zu erwarten, daß verstärkt auftretende kurzfristige Temperaturschwankungen die Wurzel einem gewissen Streß aussetzen, wodurch die Veränderungen der Zellstruktur ausgelöst werden.

Hinzu kommt die bei einer Freilegung einsetzende direkte Bestrahlung der Wurzeloberfläche durch das Licht. Neben einer möglichen photosynthetischen Reaktion der inneren Schichten der Borke, scheint aber auch hier die Temperatur eine Rolle zu spielen. Berücksichtigt man die Ergebnisse der Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Lichtspektren auf das Wurzelwachstum (FAYLE 1968), fällt auf, daß rotes Licht die stärksten Veränderungen hervorruft (Abbildung 8). Dieses Spektrum stellt aber auch den Übergang zur Wärmestrahlung dar. Deren Einfluß wurde bisher nicht untersucht.

Eine direkte Bestrahlung der Wurzeloberfläche führt sicherlich zu einer deutlichen Temperaturerhöhung der äußeren Wurzelschichten. Eine auch noch so geringmächtige Substratauflage aber sollte diese direkte Temperatureinwirkung verhindern.

Diese Überlegungen führen zu dem Schluß, daß die Temperatur der dominierende (wenn auch nicht alleinige) Faktor ist, der die Veränderungen der Strukturen im Jahrringbild einer Wurzel hervorruft.

## 5.5 Strukturveränderung und Funktionswechsel

Die Bestimmung der Strukturveränderungen freigelegter und nicht freigelegter Wurzeln wirft neben der Frage nach den Einflußfaktoren auch die Frage nach dem Grund der Veränderungen auf. Eine Steigerung der Zellanzahl wie auch der Zellwandstärke innerhalb eines Jahrringes bedeutet einen erhöhten Energieaufwand für den Baum. Diese Investition von Stoffreserven in einen Strukturwandel erscheint nur dann sinnvoll, wenn daraus ein Vorteil für die gesamte Pflanze zu erkennen ist. Dabei kann es sich einerseits um eine reine Schutzfunktion zur Vermeidung einer Schädigung der entsprechenden Wurzel handeln. Andererseits aber auch um einen beginnenden Funktionswechsel der Wurzel als Reaktion auf eine Veränderung der Umgebungsbedingungen. Wahrscheinlich handelt es sich um eine Kombination dieser beiden Möglichkeiten.

Die genaue Beantwortung dieser Frage fällt eher in den Bereich der Pflanzenphysiologie, die Analyse von Wachstumsreaktionen erfordert jedoch ein umfassenderes Verständnis der Zusammenhänge im Wachstumsverhalten einer Pflanze. Aus diesem Grund wird dieser Frage hier mit einfachen Mitteln nachgegangen. Das Ziel dieser Überlegung ist darin zu sehen, mögliche Erklärungen für das Einsetzen bestimmter Reaktionen zu finden, um sie im Kontext regelhaft auftretender Merkmale des Wurzelwachstums in weitere Analysen einzubeziehen.

Betrachtet man zunächst die Struktur tiefliegender Wurzeln fällt auf, daß die Jahrringe häufig kleinräumig deformiert erscheinen. Die Anordnung der Frühholzzellen, aber vor allem auch der Spätholzzellen ist innerhalb des Jahrringes sehr variabel. Da die Jahrringe zumeist nur aus wenigen Zellreihen aufgebaut sind, wird der Eindruck einer unregelmäßigen Jahrringausprägung zusätzlich verstärkt. Vor allem aber sind auskeilende Jahrringe in diesen Strukturen sehr oft zu erkennen. Druckholzähnliche Zellstrukturen (verstärkte Ausbildung der Zellwände, rundliche Erscheinung der Zellen bei geringer Größenreduktion) sind dagegen nicht existent. Variationen der Jahrringbreite sind meist begleitet von Verbiegungen der Markstrahlen, die auf mechanische Belastungen hindeuten. Dieser Zellaufbau vermittelt den Eindruck einer hoch flexiblen Struktur, die den jeweiligen Bedingungen des Untergrundes ohne großen Energieaufwand angepasst werden kann.

Vergleicht man diesen Aufbau nun mit der Jahrringstruktur verschiedener Wurzeln aus geringer Bodentiefe (ca. 5cm), ergibt sich ein völlig anderes Bild. Die Anzahl der Zellen im Früh- wie auch im Spätholz ist höher, die Spätholzzellen sind stärker abgeflacht und zeigen deutlich stärkere Zellwände. Auskeilende Jahrringe sind äußerst selten. Sie sind vornehmlich in Wurzeln zu finden, die offensichtlich durch mechanische Belastungen ein stark einseitiges (exzentrisches) Wachstum aufweisen. Druckholzähnliche Strukturen im Jahrring sind deutlich ausgeprägt. Dies gilt in noch

höherem Maße für freigelegte Wurzelbereiche. Vor allem wenn die Wurzel den Bodenkontakt verliert, sind Druckholzerscheinungen klar ausgeprägt. Auskeilende Jahrringe konnten in freigelegten Wurzelbereichen nicht nachgewiesen werden. Dies schließt zwar nicht grundlegend ein mögliches Auftreten aus, zeigt aber einen deutlichen Unterschied zu der Jahrringausprägung tiefliegender Wurzeln (Abbildung 50).

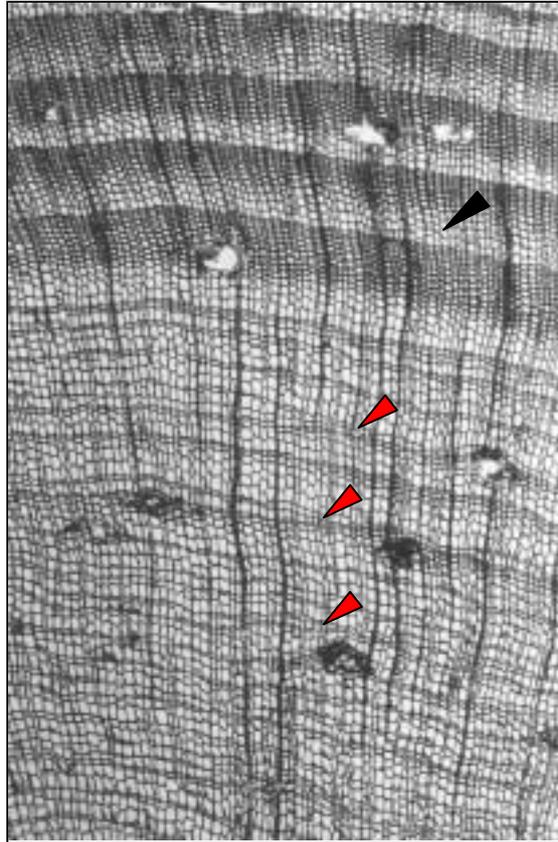


Abb. 50: Dünnschnittaufnahme einer *Pinus sylvestris* Wurzel. Deutlich zu erkennen ist der schnelle Übergang der Jahrringstruktur als Reaktion einer schnellen Annäherung an die Oberfläche mit nachfolgender Freilegung (Zellgrößenreduktion, schwarzer Pfeil). Die Jahrringe vor der Annäherung sind deutlich unregelmäßiger ausgebildet, auskeilende Jahrringe (rote Pfeile) sind häufig zu finden.

Die zunehmend deutlichere Ausprägung der Jahrringstruktur, beginnend mit der zunehmend starken Ausbildung der Spätholzzellen scheint eine Stabilisierung der Wurzel nach sich zu ziehen. Am augenfälligsten ist dies, wenn man die Festigkeit einer tiefliegenden Wurzelprobe mit der einer Wurzel nahe der Oberfläche vergleicht. Eine Wurzel aus größerer Tiefe läßt sich sehr einfach in allen Richtungen verbiegen, bei Wurzeln nahe der Oberfläche ist dies kaum möglich.

Mit der deutlicheren Ausprägung der Jahrringstruktur bei abnehmender Tiefenlage ist somit eine Stabilisierung der Wurzel selbst verbunden. Diese Feststellung legt die Vermutung nahe, daß mit dieser Veränderung auch ein Funktionswechsel verbunden ist.

Die zur Untersuchung dieser Vermutung durchgeführten Saugversuche an mehreren Wurzeln von *Larix decidua* und *Picea abies* aus unterschiedlichen Tiefenlagen scheinen dies zu bestätigen (Abbildung 51). Wurzelproben aus 14cm Tiefe zeigen eine gleichmäßige Einfärbung der Jahrringe, woraus geschlossen wird, daß eine Leitungsfunktion, also der Stofftransport bei diesen Wurzeln als dominante Funktion anzusehen ist (Abbildung 51 a und b). Vergleicht man die Ergebnisse der Färbeversuche freigelegter Wurzeln mit diesen tiefliegenden Wurzeln, ist ein deutlicher Unterschied erkennbar. Die Einfärbung beschränkt sich nur noch auf wenige Bereiche des Wurzeldurchmessers, bei einigen Probe sogar nur auf die äußeren Jahrringe (Abbildung 51 c, d und e).

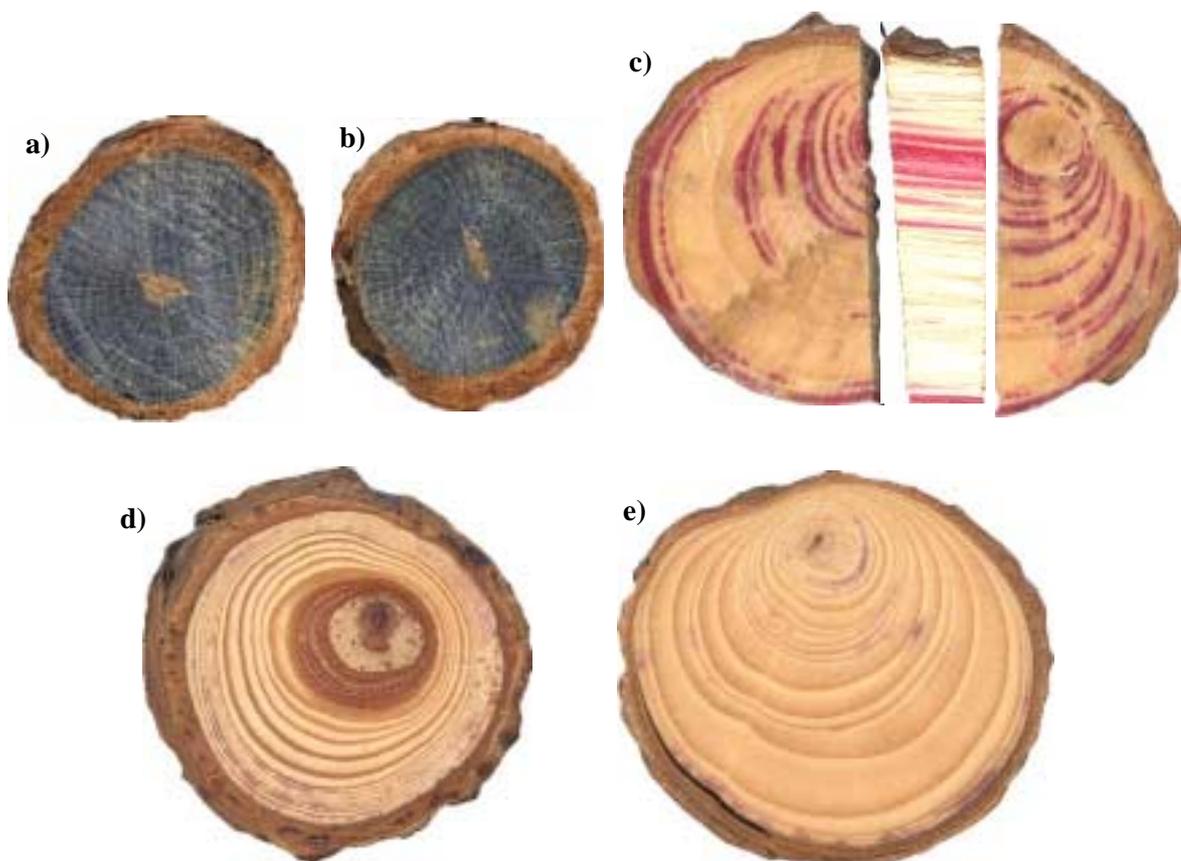


Abb. 51: Ergebnisse einiger Saugversuche mit den Färbemitteln Cobald-Blau und Safranin (rot).  
**a)** *Larix decidua* 14cm Tiefe, **b)** *Larix decidua* 10cm Tiefe, **c)** + **e)** *Picea abies* freigelegt, **d)** *Larix decidua* freigelegt.

Die Ergebnisse legen nahe, daß die unterschiedliche Strukturausprägung der Jahrringe einer Wurzel in unterschiedlichen Tiefenlagen durch eine unterschiedliche Gewichtung ihrer Funktionen gesteuert ist.

Bei tiefliegenden Wurzeln, vor allem bei zunehmender Entfernung vom Stamm, scheint eine Notwendigkeit der Stabilisierung der Pflanze durch einen stärker ausgeprägten Zellaufbau (Stützfunktion) nicht gegeben zu sein. Zudem können unterschiedliche Zug- und Druckbelastungen durch einen stärkeren Umgebungsdruck des Substrates gepuffert werden.

Dies erscheint anders, wenn eine Wurzel, oder zumindest ein Teil einer Wurzel näher an der Oberfläche liegt. Die deutlichere Ausprägung der Jahrringstruktur, die möglicherweise dominant durch stärkere Temperaturvariationen der Umgebung gesteuert ist (Kapitel 5.4), setzt die Flexibilität der Wurzel herab und erfordert damit eine andere Reaktion auf sich verändernde Druckbelastungen. Die Ausbildung von Druckholz, oder Druckholz ähnlichen Strukturen in unterschiedlichen Richtungen, führt zu einer weiteren Stabilisierung der Wurzel. Die unterschiedlichen Richtungen der Reaktionsholzbildung scheint dabei auch die Statolithen unabhängige Theorie der Reizwahrnehmung (Kapitel 2.3.1, Gravitropismus) zu stützen.

Bei diesen Veränderungen spielt wahrscheinlich auch der geringere Umgebungsdruck eine Rolle. Auch wenn die Temperatur als dominant steuernder Faktor der unterschiedlichen Jahrringstrukturen gesehen werden kann, dürfen die Einflüsse anderer Umweltfaktoren nicht außer Acht gelassen werden. Der offensichtlich auftretende Funktionswechsel kann sowohl als Schutzreaktion der Wurzel selbst vor zunehmenden Störeinflüssen der veränderten Umgebung wie auch als Beitrag zur Stabilisierung des gesamten Baumes gesehen werden. Die aus den Veränderungen resultierenden Einflüsse auf den Stofftransport und damit auf die Versorgung des Baumes mit Nährstoffen können hierbei allerdings nicht abgeschätzt werden.

## 5.6 Möglichkeiten der Anwendung

Die Bestimmung der Zellgrößenreduktion um 50% im Frühholz freigelegter Wurzeln von *Larix decidua*, *Picea abies*, *Pinus cembra* und *Pinus sylvestris* als diagnostisches Merkmal einer Freilegung eröffnet neue Möglichkeiten in der Rekonstruktion und Datierung geomorphologischer Prozesse. Die Bestimmung des Freilegungszeitpunktes zur Datierung einzelner Ereignisse wurde bereits in Kapitel 5.2 angeführt. Gleiches gilt für die Analyse kontinuierlicher Freilegungsprozesse. Weitere daraus resultierende Anwendungsmöglichkeiten in der Geomorphologie werden nachfolgend kurz besprochen und mit einem Anwendungsbeispiel zur Rekonstruktion von Spaltenöffnungen an der Wellenkalkschichtstufe in Thüringen abgeschlossen.

### 5.6.1 Rekonstruktion von Abtragsraten

Verglichen mit bisherigen Methoden der Abtragsrekonstruktion (LAMARCHE 1961, CARRARA & CARROLL 1979) ermöglicht die Berücksichtigung der Veränderung der Jahrringstruktur einer Wurzel durch eine Verringerung der Tiefenlage und die genaue Bestimmung des Freilegungszeitpunktes eine genauere Rekonstruktion kontinuierlicher Abtragsraten im Bereich der Wurzelumgebung. Dies ist auch darauf zurückzuführen, daß die Wurzel selbst ihre relative Lage zur Oberfläche mit der Zeit verändert.

In Folge des kontinuierlichen Wurzelwachstums entspricht zum Zeitpunkt der Probenahme weder die Position der Wurzeloberkante noch die des Wurzelzentrums der Situation, die zum Zeitpunkt der Freilegung gegeben war. Eine Rekonstruktion der vorausgegangenen Situation ist also erforderlich. Dies erfordert zunächst ein genaues Vermessen der Wurzelposition relativ zur Oberfläche zum Zeitpunkt der Probenahme. Die anschließende Bestimmung des Freilegungszeitpunktes der Wurzel unter Berücksichtigung des gesamten Wurzelquerschnittes erlaubt eine genaue Rekonstruktion der Wurzelgröße zum Zeitpunkt der Freilegung. Eine Kombination dieser Informationen ermöglicht die genaue Rekonstruktion der Position der Wurzel zum Zeitpunkt der Freilegung und somit eine realistische Bestimmung der Abtragsrate seit dieser Zeit (Abbildung 52).

Ignoriert man diese relative Positionsveränderung der Wurzel bei der Auswertung, führt das zu einer Überschätzung der Mächtigkeit des abgetragenen Bodenmaterials.

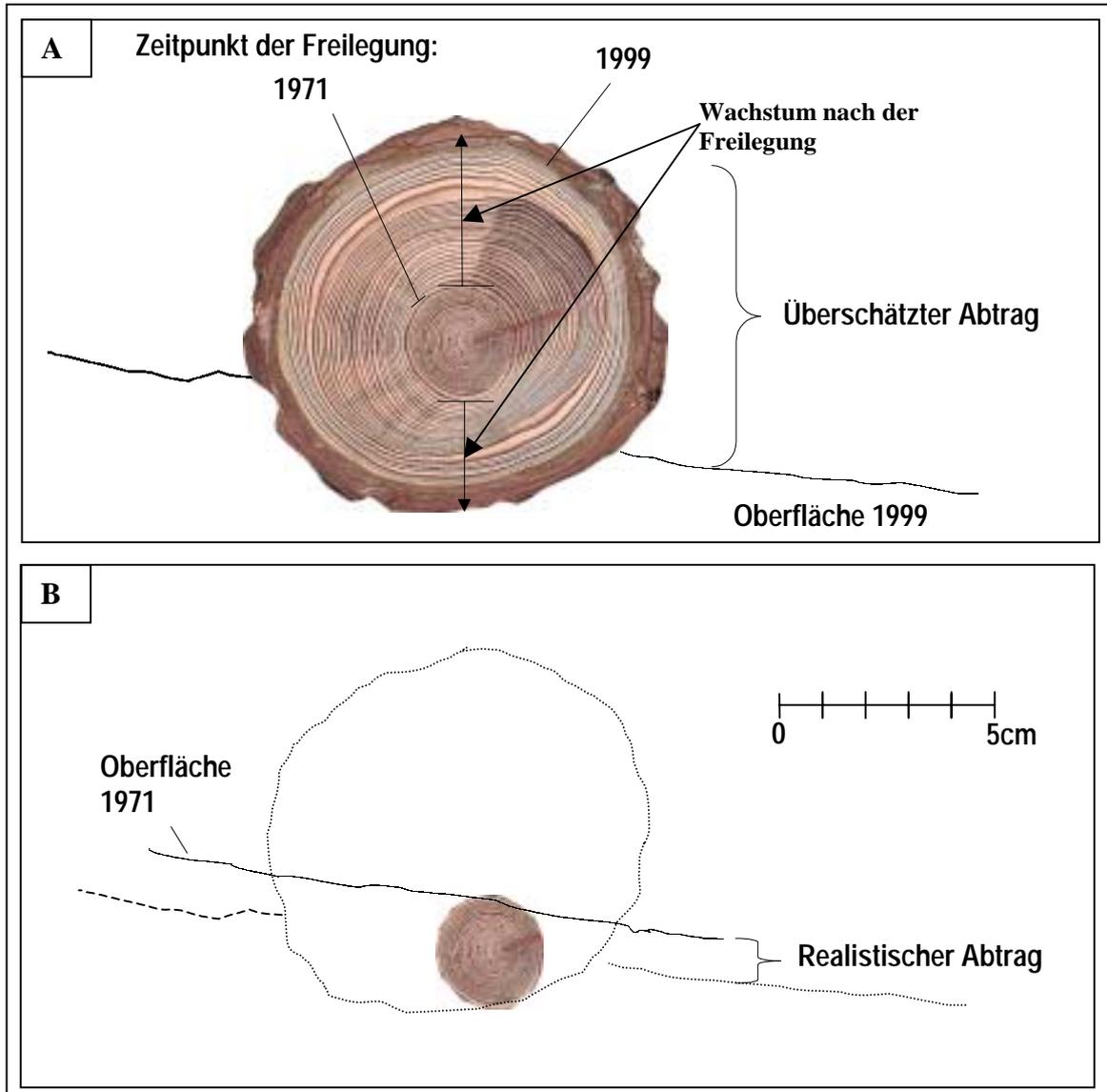


Abb. 52: Realistische Bestimmung von Bodenabtragsraten unter Einbeziehung des Freilegungszeitpunktes und des darauf folgenden Wurzelwachstums. **A)** Überschätzung der Abtragsmenge durch nicht berücksichtigtes Wurzelwachstum seit der Freilegung. **B)** Realistische Bestimmung der Abtragsmenge durch Rekonstruktion der Wurzelgröße und damit der Position der Wurzeloberkante/Bodenoberfläche zum Zeitpunkt der Freilegung.

Die Einbeziehung weiterer Informationen wie einer kontinuierlichen oder abrupten Veränderung der Jahrringstruktur einer Wurzel vor dem Zeitpunkt der Freilegung liefern zudem Informationen darüber, ob der Freilegung ein gleichmäßiger Abtrag vorausging oder ob der Abtrag eher in Intervallen erfolgte.

### 5.6.2 Anwendungsbeispiele zur Rekonstruktion von Spaltenöffnungen

Am Beispiel der Auswertung einiger Proben, die in Spalten sich ablösender Blockschollen der Wellenkalkschichtstufe verschiedener Standorte in Thüringen entnommen wurden, soll nicht nur das Potential der Analyse der Freilegungsbestimmung aufgezeigt werden, sondern vielmehr die generelle Eignung von Wurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse.

Basierend auf der Tatsache, daß Baumwurzeln grundlegend durch die Steuerung verschiedener Tropismen im Boden wachsen ergibt sich die Möglichkeit, Spalten die von Wurzeln durchzogen werden zu datieren. Hierbei ermöglicht die reine Altersbestimmung der Wurzel die Festlegung eines Maximalalters der entsprechenden Spalte. Abbildung 53 zeigt ein Beispiel der Datierung einer Spalte (Standort Heldrastein, Bleicheröder Berge, Thüringen), die über ihre gesamte Breite von Wurzeln einer Esche (*Fraxinus excelsior*) durchzogen wurde.

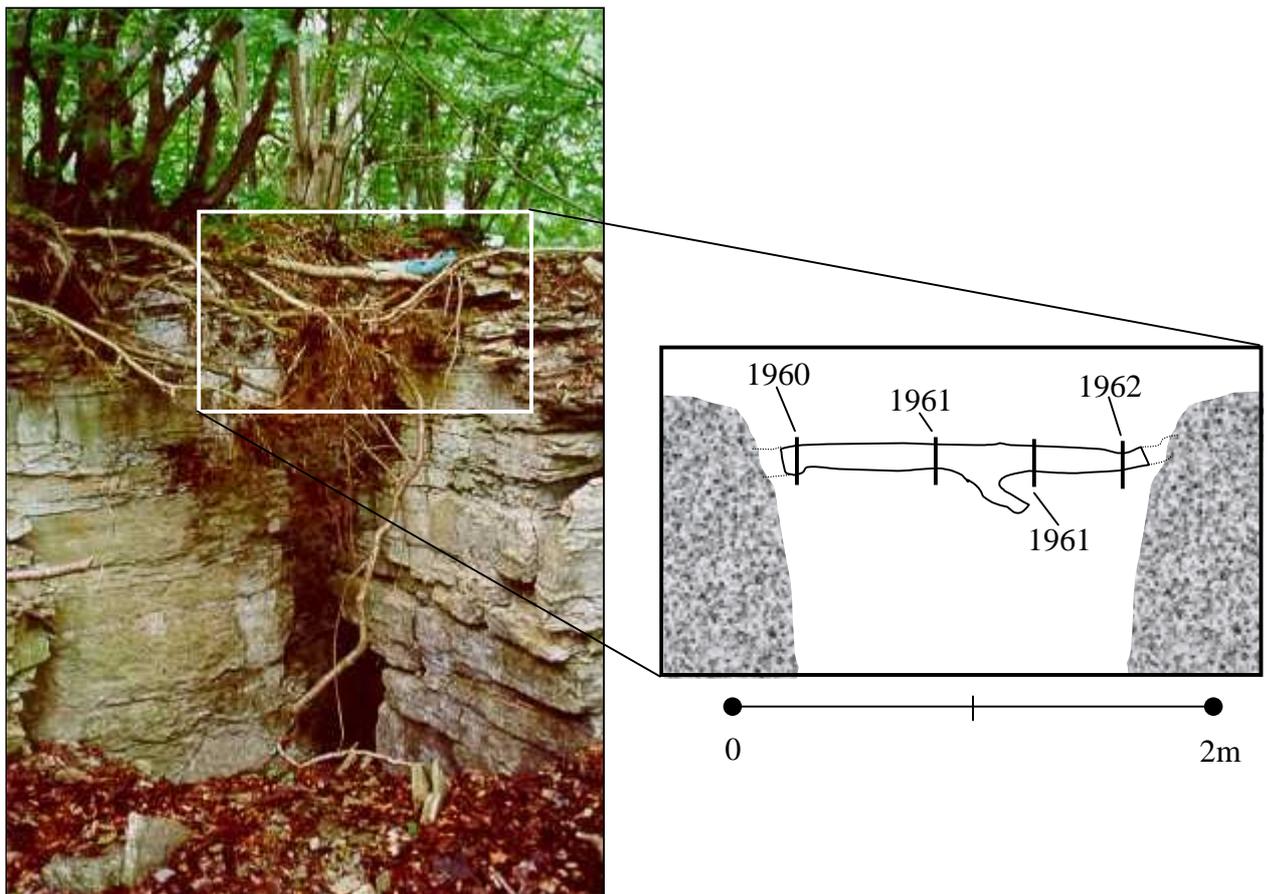


Abb. 53: Datierung verschiedener Proben einer Eschenwurzel zur Bestimmung des Maximalalters der Spalte an der Stelle der Probenahme. Der Gesteinsverband der rechten Bildhälfte stellt die sich bewegende Mauerscholle dar.

Die einfache Datierungsmöglichkeit beruht auf der Tatsache, daß die entsprechende Wurzel ihre Position innerhalb der untersuchten Spalte bereits vor der Spaltenöffnung erreicht haben mußte. Aufgrund des Längenwachstums der Wurzel wird im Verlauf der

Spalte mit zunehmender Entfernung zum Stamm ein abnehmendes Alter der Wurzelproben registriert. Das Alter der Probe auf der dem Stamm zugewandten (stabilen) Seite der Spalte gibt somit das Maximalalter der Spaltenöffnung an.

Für das Beispiel in Abbildung 53 bedeutet dies, daß die Ablösung der Mauerscholle an dieser Stelle frühestens im Jahre 1961 oder 1962 begann, da die Wurzel erst 1960 ihre Position am Randbereich der heutigen Spalte erreichte. Hätte die Spalte zu diesem Zeitpunkt bereits existiert, hätte die Wurzel diese Kluft nicht überwinden können.

Auch wenn hier nur ein Maximalalter angegeben werden kann, ermöglicht dies doch eine grundlegende Altersbestimmung der Spalte, die mit anderen Methoden nicht möglich ist.

Die gewonnenen Erkenntnisse über Freilegungsreaktionen bei Nadelholzwurzeln ermöglichen weitaus detailliertere Rekonstruktionen über den Zeitpunkt wie auch den Verlauf solcher Spaltenöffnungen. Als abschließendes Beispiel dient hier die Freilegungsreaktion einer *Pinus sylvestris* Wurzel, die auf der stabilen Seite der Spalte in ca. 20cm Tiefe freigelegt wurde (Standort Kammerlöcher bei Arnstadt, Thüringen) (Abbildung 54).

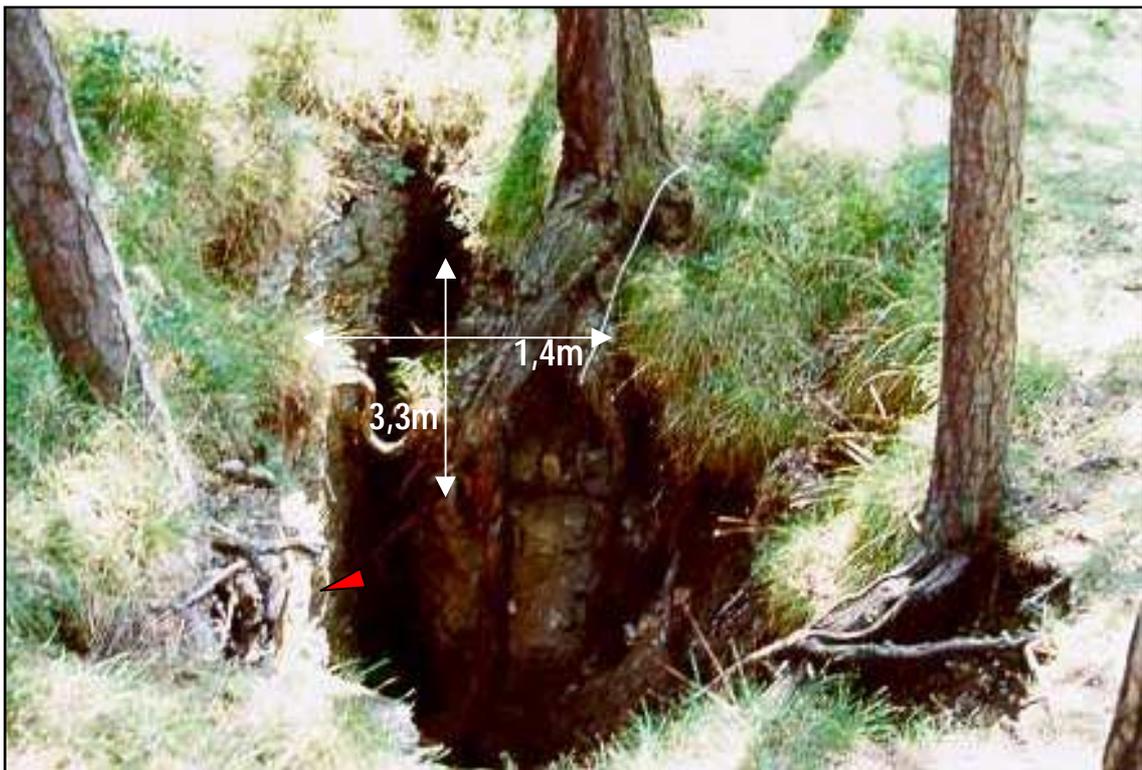
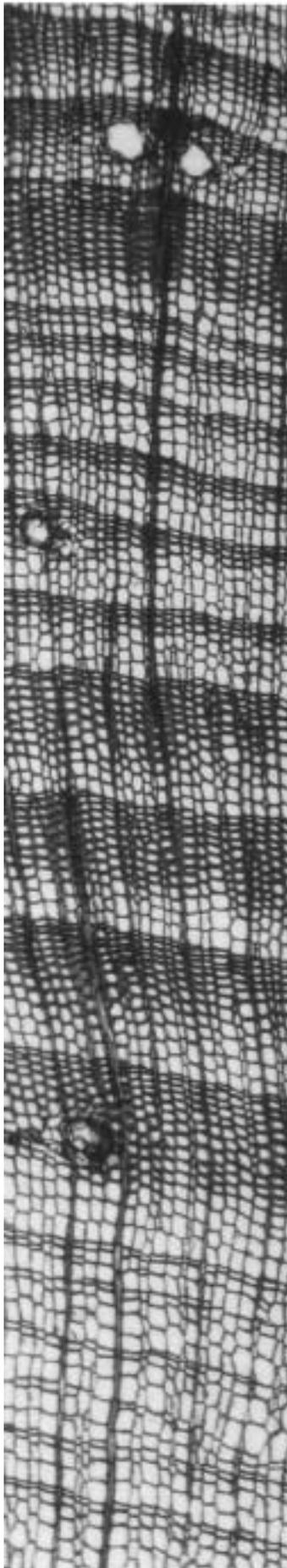


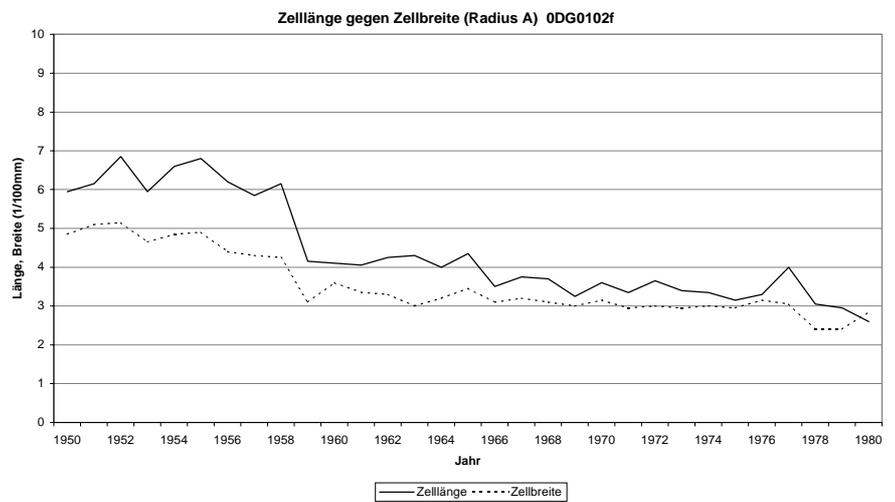
Abb. 54: Entnahmesituation der *Pinus sylvestris* Probe ODG0102f (roter Pfeil) am Standort Kammerlöcher, Arnstadt, Thüringen.

*Pinus sylvestris* Wurzel  
ODG0102f (20-fach)

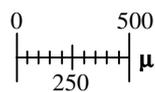
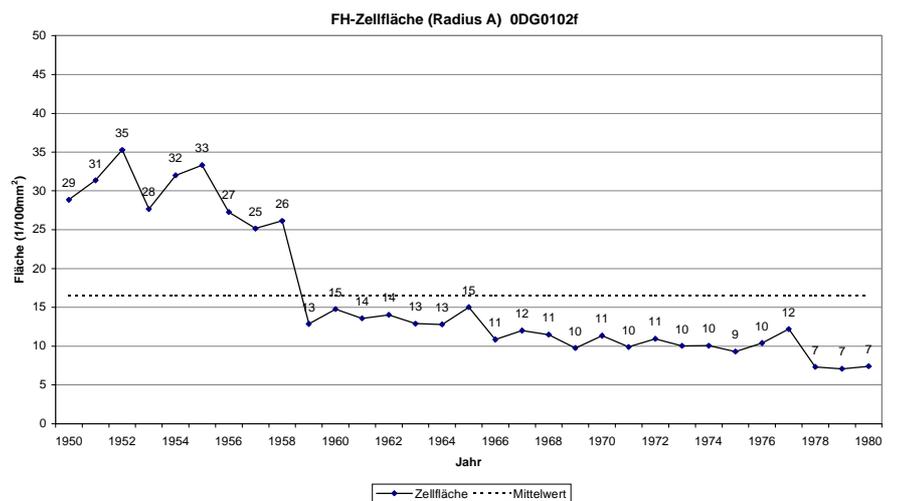


1970

Abb. 55: Dünnschnitt der freigelegten *Pinus sylvestris* Wurzelprobe ODG0102f, Standort Kammerlöcher, Arnstadt, Thüringen. Zu erkennen ist die deutliche Strukturveränderung 1958. Die Diagramme zeigen die Reduktion der Größe der Frühholzzellen ab 1959 und somit die Freilegung der Wurzel in diesem Jahr.



1960



Die Auswertung der Zellgrößenreduktion ergab deutliche Anhaltspunkte für eine beginnende Spaltenöffnung 1958 (Abbildung 55). Der entsprechende Jahrring zeigt eine deutliche Veränderung der Spätholzstruktur in diesem Jahr. Die Umgebungsverhältnisse müssen sich also gegenüber 1957 entscheidend verändert haben. Bereits im Jahrring 1959 ist eine deutliche Reduktion der Größe der Frühholzzellen zu erkennen. Dies spricht für eine entgültige Freilegung dieses Wurzelbereiches im Jahr 1959.

Die Untersuchung weiterer 4 Bäume am Rand der Spalte (*Pinus sylvestris* und *Larix decidua*) ergab ähnliche Reaktionen, allerdings stärker in die 60er Jahre verlagert. Diese Verzögerung einsetzender Reaktionen ist auf die Lage der Bäume zur eigentlichen Spalte zu erklären. Im Gegensatz zur vorgestellten Probe ODG0102f sind diese stärker durch sekundäres Nachrutschen des Randmaterials nach der Öffnung beeinflusst und damit den direkten Bewegungseinflüssen der Spalte später ausgesetzt.

## 5.7 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden 320 Wurzelscheiben von 79 Wurzeln, entnommen an 47 Nadelbäumen unterschiedlicher Standorte untersucht um (i) normales Wachstum einer Wurzel zu definieren, (ii) Abweichungen von diesem Normalzustand als Reaktion auf eine Freilegung zu erkennen und (iii) die resultierenden diagnostischen Merkmale mit geomorphologischen Prozessen in Verbindung zu bringen um die quantitative und zeitliche Dynamik dieser Prozesse zu rekonstruieren.

Bei knapp 50% der Bäume (23) handelt es sich um *Larix decidua* Mill. Diese Baumart bildete die Grundlage zur Bestimmung spezieller Merkmale freigelegter aber auch nicht freigelegter Wurzeln, die erfolgreich auf Wurzeln der Baumarten *Picea abies* (L.) Karst., *Pinus cembra ssp. sibirica* und *Pinus sylvestris* L. übertragen werden können. In die Analysen einbezogen wurden 26 nicht freigelegte, 33 kontinuierlich und 20 schnell freigelegte Wurzeln.

Die Auswertung nicht freigelegter Wurzeln unter Berücksichtigung ihrer genauen Lage relativ zur Bodenoberfläche hat erstmals gezeigt, daß die Möglichkeit der Definition einer „normalen“ Wurzelstruktur in Abhängigkeit von der Tiefenlage besteht. Entgegen der bisherigen Vorgehensweise, Jahrringstrukturen der Wurzeln ausschließlich auf Grundlage ihrer Entfernung zum Stamm zu analysieren, zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit eindeutig, daß es Unterschiede in der Ausprägung der Jahrringstruktur der Wurzeln gibt, die sich der jeweiligen Tiefenlage einer Wurzelprobe zuordnen lassen. Diese Erkenntnis schließt den Einfluß des Stammes, besser gesagt der oberirdischen Strukturen des Baumes nicht aus. Die bestehenden Wechselwirkungen bezüglich der Nährstoffversorgung und Stoffspeicherung zwischen den ober- und unterirdischen Strukturen der Bäume sind unbestritten. Gleiches gilt auch für die mechanische Beeinflussung der stammnahen Wurzelbereiche. Allerdings zeigt sich in der Strukturausprägung der Jahrringe einer Wurzel doch eine Dominanz der Beeinflussung durch die direkten Umweltbedingungen, auf die schon WIELER (1891) im Rahmen seiner Ausführungen über die Beziehungen zwischen Wurzel- und Stammholz grundlegend hingewiesen hat.

Die deutlichen Übereinstimmungen der Jahrringstrukturen der Wurzelproben aus vergleichbaren Bodentiefen wie auch die zunehmend stammähnlichere Ausprägung bei einem verringerten Abstand zur Oberfläche zeigen einerseits, daß diese viel zitierte Aussage nicht als Kriterium einer Freilegung herangezogen werden kann. Andererseits ergibt sich daraus die Möglichkeit, eine normale Wurzelstruktur zumindest in Grundzügen zu definieren. Dies kann allerdings nur unter Berücksichtigung der Freilegungsreaktionen geschehen. Aus diesem Grund wird zunächst die Bestimmung der diagnostischen Merkmale einer Freilegung zusammengefaßt.

Der methodische Ansatz der Auswertungen freigelegter Wurzeln, der auf der Einbeziehung einer detaillierten Geländeansprache inkl. Prozeßbestimmung beruht und die unterschiedlichen Strukturen nicht freigelegter Wurzeln verschiedener Bodentiefen vergleichend berücksichtigt, zeigt erstmals ein eindeutiges Kriterium für den Zeitpunkt der Freilegung:

Die andauernde Reduktion (> 3 Jahre) der Größe der Frühholzzellen im Querschnitt um 50% im Verhältnis zu der Größe der Frühholzzellen der vorausgehenden Jahrringe des gleichen Querschnittes.

Dabei ist zu beachten, daß es sowohl intra- als auch interannuelle Schwankungen dieser Größe gibt, die auch durch mechanische Störungen ausgelöst werden können. So ist eine kurzfristige (1 – 2 Jahre) deutliche Reduktion der radialen Länge der Zellen im Querschnitt ein Zeichen für mechanische Störungen, die hauptsächlich in der Umgebung traumatischer Harzkanalreihen auftritt. Auch die Ausbildung druckholzähnlicher Strukturen führt zu einer leichten Größenreduktion der Zellen bei deutlichem Anstieg der Zellwandstärke. Diese Strukturen können nicht als Zeichen einer Freilegung angesehen werden und müssen somit bei jeder Auswertung der Zellgrößenvariationen berücksichtigt werden.

Somit ist eine Freilegungsreaktion durch eine gleichartige Reduktion der radialen Länge **und** der tangentialen Breite der Frühholzzellen gekennzeichnet, wobei keine signifikante Verdickung der Zellwände eintritt.

Die Reduktion ist zudem reversibel, da einige Proben, die nach der Freilegung durch eine Akkumulation organischen Materials wieder überdeckt wurden einen leichten Anstieg der Frühholzzellgrößen zeigen. Diese Reaktion ist jedoch nicht abschließend verifiziert und erfordert weitere Untersuchungen auf der Grundlage zahlreicher wiederverschütteter Wurzeln.

Mit Ausnahme dieses diagnostischen Merkmals – der Veränderung der Zellgröße - sind alle anderen Variationen der Jahrringausprägung auch bei nicht freigelegten Wurzeln nachweisbar. Die (Veränderung der) Zellgröße ist das einzige anatomische Merkmal, das eindeutig eine Wurzelfreilegung nachweist und somit spezifisch diagnostisch ist. Abgesehen von einem leichten Anstieg der Zellanzahl im Frühholz bei geringerer Bodentiefe konzentrieren sich diesbezügliche Veränderungen auf die Ausprägung der Spätholzzellen (Abbildung 56). Diese Veränderung setzt ungefähr in einer Bodentiefe von 12 - 10cm ein und verstärkt sich mit zunehmender Annäherung an die Oberfläche, wodurch eine stammähnliche Jahrringstruktur mit ausgeprägtem Wechsel von Spät- zu Frühholzzellen an der Jahrringgrenze entsteht.

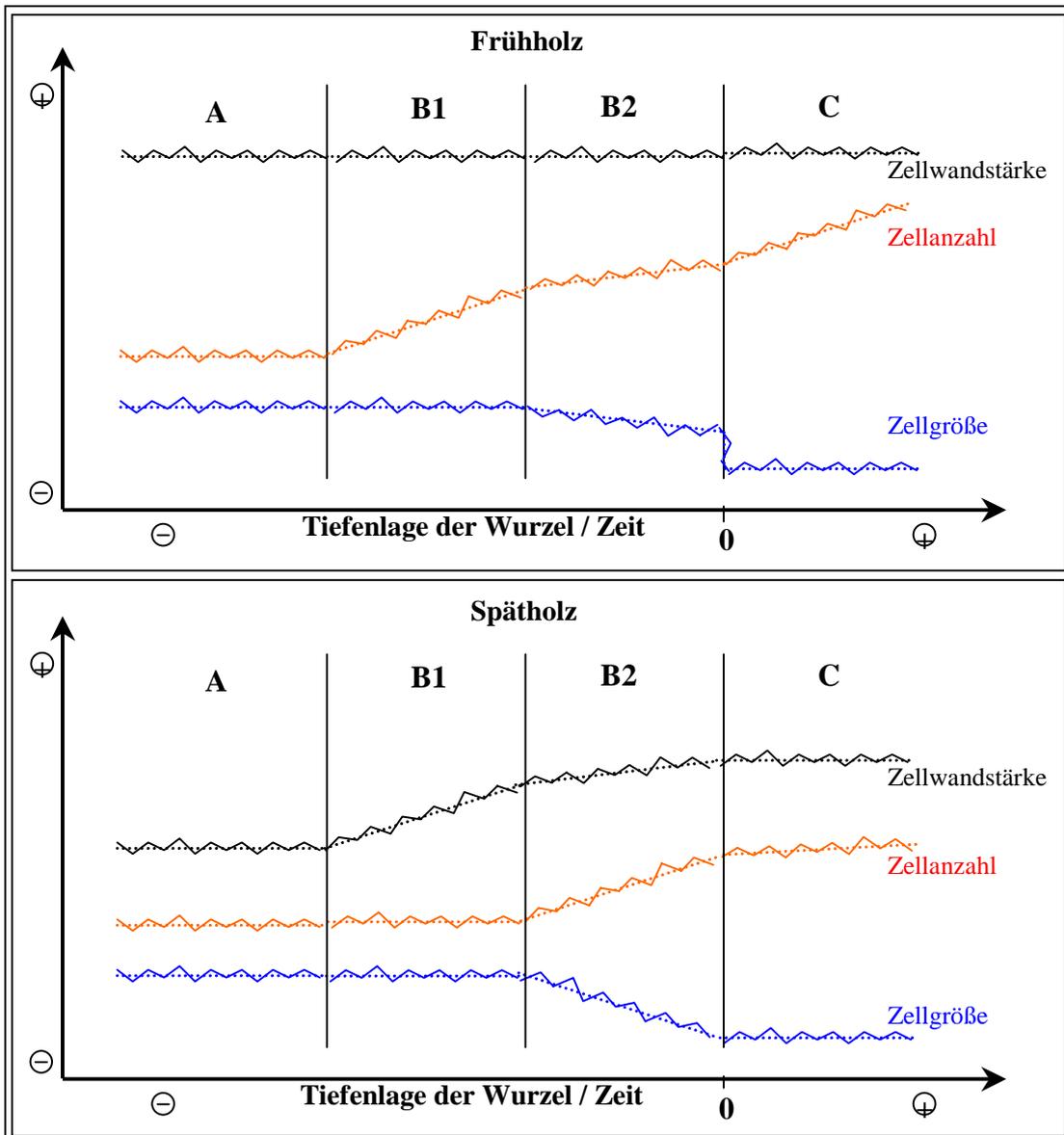


Abb. 56: Schematische Darstellung der Veränderung der Zellstruktur im Jahring einer Wurzel in unterschiedlichen Tiefen / bei Annäherung an die Oberfläche getrennt nach Früh- und Spätholz. **A:** Einheitliche Wurzelstruktur unterhalb 12cm Bodentiefe. **B1:** Veränderungen im Bereich 12 – 10cm Bodentiefe. **B2:** Veränderungen zwischen 10 – 0cm Tiefe. **C:** Veränderung nach Freilegung.

Demnach kann eine normale Wurzelstruktur nur in Abhängigkeit ihrer Tiefenlage definiert werden:

- (i) 15 – 12cm und tiefer: Geringe Zellanzahl (1-3 Zellreihen) im Frühholz und undeutlich ausgeprägte, dünnwandige Spätholzzellen (1 – max. 2 Zellreihen), häufiges Auftreten auskeilender Jahrringe und Jahrringdeformationen ohne Anzeichen der Bildung von Reaktionsholz.

- (ii) 12 – 10cm: Verdickung der Zellwände im Spätholz, vereinzelt leichte Vergrößerung des Zellvolumens, leichter (variabler) Anstieg der Zellanzahl im Frühholz, Zellanzahl im Spätholz 2 – 3 Zellreihen.
- (iii) 10 – 0cm: Spätholzzellen tangential abgeflacht, deutlich verdickte Zellwände, geringes Zellvolumen, leichte Verringerung der Zellgröße. Anstieg der Zellanzahl im Frühholz bei leichter Verringerung der Zellgröße. Deutlich stammähnliche Ausprägung der Jahrringstruktur.

Die genauen Tiefenangaben dürfen dabei nicht als absolut angesehen werden. Sie basieren auf den gewonnenen Werten der Auswertungen, sind aber vom Substrat abhängig und können durchaus um einige Zentimeter variieren.

Zu beachten ist, daß sich die beschriebenen anatomischen Reaktionen ausschließlich auf die freigelegten Wurzelbereiche beschränken. Eine Ausdehnung der Reaktionsmuster auf im Boden verbliebene Bereiche einer Wurzel ist nicht gegeben.

Abbildung 57 aggregiert die Merkmalsveränderungen bei Zellgröße und –anzahl für Früh- und Spätholz, ausgelöst durch Freilegungsprozesse.

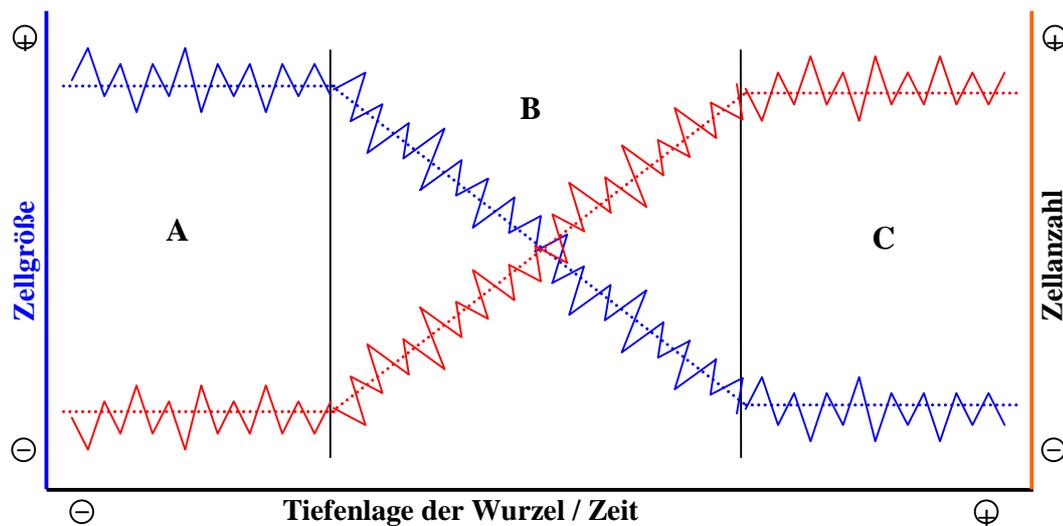


Abb. 57: Schematische Darstellung der Veränderung der Wurzelstruktur durch eine Freilegung. **A:** Wurzel im Substrat. **B:** Moment der Freilegung. **C:** Freigelegt.

Die kombinierte Betrachtung von Zellstrukturveränderungen erlaubt neben der reinen Datierung des Freilegungszeitpunktes anhand der Größenreduktion der Frühholzzellen auch eine Unterscheidung zwischen schneller und kontinuierlicher Freilegung.

Bei einer schnellen Freilegung wurde eine sofortige Zellgrößenreduktion um 50% und ein Wechsel zu stammähnlichen Strukturen nachgewiesen. Erfolgt die Freilegung gleichmäßig über einen längeren Zeitraum, wird zunächst über Jahre hinweg eine jahrringähnliche Struktur mit den erläuterten Merkmalen gebildet, erst danach erfolgt

die Größenreduktion im Bereich der Frühholzzellen. Auch diese Reduktion kann kontinuierlich erfolgen. Allerdings ist der Spielraum für die Reduktion äußerst begrenzt. Bei minimaler Überdeckung (<1cm) ist sie nicht erkennbar. Ist die Wurzeloberfläche auf einer Breite von 1cm freigelegt, konnte eine Reduktion von 50% nachgewiesen werden.

Da die größten Veränderungen bereits unter Lichtausschluß im Boden beginnen, wird das Licht als auslösender Faktor ausgeschlossen. Temperaturveränderungen dominieren demnach die holzanatomischen, diagnostischen Strukturveränderungen.

Im Zuge der Veränderungen der Jahrringstruktur bei einer Annäherung an die Oberfläche zeichnet sich auch ein möglicher Funktionswechsel der Wurzel ab. Mit der zunehmend deutlicheren Ausbildung der Spätholzzellen scheint eine Stabilisierung der Wurzelstruktur an sich verknüpft. Auskeilende Jahrringe sowie starke, kleinräumige Deformationen der Jahrringe sind in geringeren Bodentiefen kaum nachzuweisen. Statt dessen werden deutliche Reaktionsholzstrukturen ausgebildet, die einer mechanischen Belastung entgegenwirken können.

## 6 Diskussion

Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewandte Methodenverbund geomorphologischer und dendrochronologischer Arbeitsweisen führte zu eindeutig verwertbaren Ergebnissen. Die Anwendung einer detaillierten geomorphologischen Geländeansprache, der daraus resultierenden Prozeßbestimmung und der genauen Dokumentation der Position der gesamten zu analysierenden Wurzelprobe in ihrem Verhältnis zur Geländeoberfläche als Basis der weiterführenden holzanatomischen Analyse ermöglichte erstmals die Bestimmung charakteristischer Merkmale der Jahrringstruktur einer Wurzel in Abhängigkeit ihrer Tiefenlage.

Darüber hinaus wurde der Nachweis eines charakteristischen holzanatomischen Merkmals im Querschnitt der Wurzeln von *Larix decidua* Mill., *Picea abies* (L.) Karst., *Pinus cembra* ssp. *sibirica* und *Pinus sylvestris* L. zur Bestimmung des Freilegungszeitpunktes erbracht.

Es hat sich gezeigt, daß die Jahrringstruktur einer Wurzel in unterschiedlichen Distanzen zum Stammansatz klare Beziehungen zu ihrer entsprechenden Tiefenlage aufweist. Die Entfernung zum Stamm scheint dabei keinen Einfluß zu haben. Dies gilt für alle Proben dieser Untersuchung. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß alle Proben in einem Mindestabstand von einem Meter zum Stamm entnommen wurden, um eventuell auftretende mechanische Beeinflussungen durch den Stamm zu minimieren. Somit können keine Aussagen über Wurzelbereiche getroffen werden, die sich innerhalb dieser Distanz befinden.

Alle bisherigen Ansätze holzanatomischer Wurzelanalysen zur Bestimmung einer Freilegungsreaktion versuchten Zellveränderungen in Abhängigkeit ihrer Distanz zum Stamm zu bestimmen. Die genaue Position der entsprechenden Wurzelproben relativ zur Oberfläche wurde nie dokumentiert (FAYLE 1968).

Anders verhält es sich bei geomorphologischen Untersuchungen freigelegter Wurzeln zur Abtragsrekonstruktion (CARRARA & CARROLL 1979, Dunne et al. 1978 EARDLEY 1967, LAMARCHE 1961, 1963, 1968, Morneau & Payette 1998). Hier wurde zwar die genaue Position der freigelegten Wurzelbereiche vermessen, eine holzanatomische Analyse wurde aber nie durchgeführt. Zur Abtragsrekonstruktion wurden lediglich einfache Parameter wie Alter und Größe einer Wurzel oder makroskopisch erkennbare Merkmale wie Verletzungen und das Einsetzen stammähnlicher Strukturen der Jahrringe verwendet.

Das Potential einer Verknüpfung dieser beiden Ansätze und der daraus resultierenden Merkmalsbestimmungen wurde im Rahmen der Ergebnisdarstellung verdeutlicht. Die Entwicklung der Jahrringstrukturen nicht freigelegter Wurzeln hin zu einer deutlich stammähnlichen Ausprägung bei zunehmend geringer Entfernung zur Oberfläche zeigt,

daß dieses Merkmal nicht grundlegend mit einer Freilegung in Verbindung gebracht werden kann.

Diese Tatsache und die ausschließlich auf freigelegte Wurzelbereiche beschränkte 50-prozentige Größenreduktion der Frühholzzellen im Querschnitt widerlegt die Aussage von FAYLE (1968), daß sich Merkmale einer Freilegung in die nicht freigelegten Teile einer Wurzel erstrecken. Die von ihm angeführten Merkmale entsprechen alle unterschiedlichen Strukturausprägungen, die hier auch bei nicht freigelegten Wurzeln in unterschiedlichen Bodentiefen und/oder als Resultat unterschiedlicher mechanischer Belastungen nachgewiesen wurden.

Die im Rahmen der Auswertungen bestimmten Merkmale schneller und kontinuierlicher Freilegungen beruhen auf einer Bestimmung des Freilegungsprozesses basierend auf einer Rekonstruktion der Ereignisse durch Auswertung vorhandener Spuren im Gelände. Die Übereinstimmung der festgestellten Merkmalsveränderungen mit der prognostizierten Art der Freilegung belegen, daß im Umkehrschluß über die Auswertung der Merkmalsausprägung im Verlauf der Jahrringabfolge eines Wurzelquerschnittes unter Berücksichtigung der Geländesituation auf die Art des Freilegungsprozesses geschlossen werden kann.

Die Bestimmung des Zeitpunktes einer schnellen Freilegung ist eindeutig. Gleiches gilt für die Bestimmung des Jahres der entgültigen Freilegung einer Wurzel durch kontinuierlichen Bodenabtrag. Dieses Datum in Verbindung mit der Rekonstruktion der Wurzelgröße und -position zum Zeitpunkt der Freilegung bietet eine Genauigkeit in der Bestimmung der quantitativen lokalen Abtragsrate, die bisher in dieser Form und Präzision nicht gegeben war.

Betrachtet man aber gerade diese Ergebnisse genauer, wird deutlich, daß das hohe Potential dieser Art der Abtragsrekonstruktion noch nicht vollständig ausgeschöpft ist. Es hat sich gezeigt, daß ein gleichmäßiger Bodenabtrag zu einer kontinuierlichen Reduktion der Zellgröße im Frühholz führt, bis diese bei entgültiger Freilegung 50% erreicht.

Diese Reaktionen erstrecken sich nach den bisherigen Ergebnissen auf einen Bereich von +/- 0.5cm unterhalb und oberhalb der Oberfläche. Es ergibt sich folglich eine Unsicherheit im Bereich des Einsetzens und der maximalen Ausprägung der Reduktion von ca. einem Zentimeter, wobei sich diese Unsicherheit mehrheitlich auf den Beginn der Reduktion vor der eigentlichen Freilegung bezieht.

Diese Unsicherheit mag gering erscheinen, jedoch wird eine genauere Analyse dieser Übergangsreaktion

- (i) die Genauigkeit einer Abtragsrekonstruktion verbessern und zunehmend absichern und
- (ii) ein besseres Verständnis der Wurzelreaktionen wie auch der entsprechenden Einflußfaktoren liefern.

Diese weiterführenden Analysen erfordern eine umfangreiche Beprobung von Wurzeln, die sich im Zuge einer kontinuierlichen Freilegung innerhalb dieser genannten Grenzen relativ zur Oberfläche befinden.

Dabei dürfen auch die entsprechenden Einflußfaktoren, welche die Reaktionen bedingen, nicht außer Acht gelassen werden. Der aufgrund der Ergebnisse postulierte dominante Einfluß der Temperatur scheint durchaus gegeben. Allerdings sind Monokausalitäten in Zusammenhang mit dem Wachstum einer Pflanze immer unter Vorbehalt zu betrachten. Vor allem dann, wenn sie nicht durch detaillierte Messungen belegt sind. Die eingangs angeführten Grundlagen des Wurzelwachstums (u.a. VON GUTTENBERG 1968, RAVEN 1988, ROBERTS & HOOLEY 1988, SITTE et al., 1998) schließen eine solche Monokausalität aus.

Entgültige Sicherheit bei der Bestimmung der Einflußfaktoren kann nur über mehrjährige Messreihen der jeweiligen Parameter (Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen, Lufttemperatur, Einstrahlungsverhältnisse, Boden- und Luftfeuchtigkeit, Substratbeschaffenheit, Bodendruckverhältnisse) an mehreren Standorten erlangt werden. Im Rahmen solcher Messreihen müssen auch verschiedene Arten der Freilegung simuliert werden, um detaillierte Analysen des unmittelbaren Übergangsbereiches der Freilegung zu ermöglichen. Die Voraussetzungen für eine gezielte Instrumentierung und Freilegungssimulation sind durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit gegeben.

Die bei der Auswertung angewandten Methoden haben sich als effizient erwiesen. Vor allem die Messung der Zellgrößen in radialer und tangentialer Richtung ermöglicht differenzierte Analysen der Zellgrößenschwankungen und letztendlich auch die Bestimmung des Freilegungszeitpunktes unter strenger Berücksichtigung der Tiefenlage jeder einzelnen Probe der Untersuchung.

Die Präparation großer Dünnschnitte, die nach Möglichkeit die gesamte Jahrringstruktur vom Zentrum zum äußeren Jahrring eines Wurzelquerschnittes repräsentieren, erlaubt eine detaillierte Analyse kontinuierlicher Strukturveränderungen, die unter Verwendung kleiner Ausschnitte der Wurzel nicht durchführbar ist.

Einschränkungen gibt es allerdings hinsichtlich der Anwendung der Graustufenanalyse. Die mehrfache Anwendung dieser Methode hat gezeigt, daß sie zur Bestimmung des Freilegungszeitpunktes nur dann geeignet ist, wenn eine deutlich erkennbare Strukturänderung gegeben ist und somit ein optisch dichter (dunkler) Eindruck der Jahrringausprägung entsteht. Sie bestätigt somit zunächst nur den visuellen Eindruck einer Veränderung. Dieser besteht aber bereits dann, wenn deutliche Schwankungen im Spätholzbereich auftreten. Hinzu kommen Unterschiede in der Belichtung der Proben bei der Aufnahme. Auch wenn diese dank einer elektronischen Steuerung minimal ausfallen, ergeben sich doch häufig Niveauunterschiede der mittleren Graustufen, welche die Auswertung erschweren. In Rahmen der durchgeführten Auswertungen konnten keine eindeutigen Wertebereiche festgelegt werden, welche eine Bestimmung des Freilegungszeitpunktes - vor allem bei kontinuierlicher Freilegung – mittels der Graustufenanalyse zulassen.

Die Saugversuche an freigelegten und nicht freigelegten Wurzeln von *Larix decidua* und *Picea abies* haben die Vermutungen bezüglich eines auftretenden Funktionswechsels der Wurzelstruktur grundlegend bestätigt. Da diese Versuch aber nicht zentraler Teil der Untersuchungen waren und somit nur ergänzend durchgeführt wurden, sollten hier weitere Versuche zur Verifizierung der Ergebnisse durchgeführt werden.

## 7 Evaluation und Ausblick

Die vorgestellten Beispiele der Bestimmung des Freilegungszeitpunktes durch unterschiedliche geomorphologische Prozesse belegen den Nutzen und das Potential der entwickelten Datierungsmethode. Gerade im Hinblick auf die zunehmende Notwendigkeit der Rekonstruktion vergangener Ereignisse im Rahmen der Naturgefahrenforschung als Grundlage der Prognose zukünftiger Ereignisse wird diese neue Methode der Wurzelanalyse von großem Nutzen sein.

Die Auswertung unterschiedlicher Wachstumsreaktionen freigelegter Wurzeln in derzeit aktiven (aber auch inaktiven) Murrinnen erlaubt, wie in den Ergebnissen dargestellt, eine Datierung von Murereignissen, die den zum Zeitpunkt des Ereignisses aktiven Kanal nicht verlassen haben. Darüber hinaus ermöglicht die Auswertung von Strukturveränderungen nicht freigelegter, dicht unter der Oberfläche eines aktiven wie auch eines inaktiven Gerinnebettes wachsender Wurzeln die Datierung schneller Oberflächenveränderungen, über die ebenfalls auf Murereignisse geschlossen werden kann. Diese Art der Murereignisse galt im Rahmen der Dendrogeomorphologie bisher als nicht erfaßbar und somit als eine in Kauf zu nehmende unüberbrückbare Datenlücke, da sie das Wachstum der umliegenden Bäume nicht beeinflussen. Dies bedeutet nicht, daß mit dieser Methode eine lückenlose Erfassung vergangener Ereignisse möglich wird. Sie wird jedoch einen entscheidenden Beitrag zur Verdichtung bestehender Murfrequenzen leisten.

Aber nicht nur im Bereich der Murgangrekonstruktion oder der ebenfalls im Ergebnisteil vorgestellten Datierung von Spaltenöffnungen eröffnet diese Methode neue Perspektiven. Anwendungen sind in allen Bereichen denkbar, in denen Beeinflussungen des Wurzelwachstums eine Rolle spielen.

Über die vielfältigen Möglichkeiten der Ereignisdatierung hinaus eröffnet die Auswertung von Wachstumsreaktionen bei Wurzeln auch neue Möglichkeiten bezüglich der quantitativen Abtragsbestimmung, die bisher ohne langjährige Messungen des Materialaustrages aus den jeweiligen Einzugsgebieten nur schwer – wenn überhaupt – abgeschätzt werden konnte.

Wenn auch der Nutzen der Methode unbestritten ist, muß doch darauf hingewiesen werden, daß es sich bei dieser Arbeit zunächst auch um die Entwicklung einer neuen Methodik zur Bestimmung der diagnostischen Merkmale handelt. Aus diesem Grund lag der Schwerpunkt der Arbeiten zunächst auf der Dokumentation aller auftretenden Jahrring- und Zellveränderungen und der daraus resultierenden Bestimmung diagnostischer Merkmale der Freilegung. Konkrete Anwendungen konnten nur eingeschränkt durchgeführt werden. Diese führten aber zu konkreten Ergebnissen, die mit der vorausgegangenen Merkmalsbestimmung übereinstimmen.

Dieses Vorgehen spiegelt sich in der Menge der Gesamtproben wider. Bei der Bestimmung des Zeitpunktes einer schnellen Freilegung sind die Ergebnisse eindeutig und bisher uneingeschränkt übertragbar. Es konnten keine Abweichungen von den beschriebenen Merkmalen festgestellt werden. Die Probemenge ist für die vorliegende Arbeit auch nicht zu gering. Für die im Rahmen der Diskussion erwähnte exakte Bestimmung der Abläufe einer kontinuierlichen Freilegung am direkten Übergang zur Oberfläche sind aber noch weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl von Proben notwendig. Hierbei sind auch nähere Informationen bezüglich der genauen Einwirkung der unterschiedlichen, im Rahmen dieser Arbeit nicht faßbaren Einflußfaktoren erforderlich.

Die vorliegende Arbeit hat eine Basis geschaffen, die eine umfassende Einbeziehung der Wurzelanalyse in dendrogeomorphologische Fragestellungen erlaubt. Um die aufgezeigte Anwendungsbreite zu stützen und zu erweitern, sollten zukünftig begleitende mehrjährige Untersuchungen unter Anwendung einer umfangreichen Instrumentierung der Standorte zur detaillierten Erfassung der zuvor aufgeführten Einflußfaktoren durchgeführt werden. Auf dieser Grundlage werden Wurzeluntersuchungen die gleiche analytische Tiefe erreichen, wie dies derzeit bei Stammauswertungen der Fall ist.

## 8 Literatur

- Agerter, S.R. & W.S. Glock (1965): An Annotated Bibliography of Tree Growth and Growth Rings 1950 – 1962. University Arizona Press, Tucson, pp. 180.
- Alestalo, J. (1971): Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105, pp.140.
- Atkinson, D. (Hrsg.) (1991): Plant Root Growth. An Ecological Perspective. Special Publication Number 10 of the British Ecological Society, Blackwell, Oxford, pp. 478.
- Bannan, M.W. (1941): Variability in root structure in roots of native Ontario conifers. In: *Bulletin Torrey Botanical Club* 68, p. 173 – 194.
- Bannan, M.W. (1954): The wood structure of some Arizonian and Californian species of Cupressus. In: *Canadian Journal of Botany* 32, p. 285 – 307.
- Bannan, M.W. (1965): The length, tangential diameter, and length/width ratio of conifer tracheids. In: *Canadian Journal of Botany* 43, p. 967 – 984.
- Baum, I. & K.-H. Schmidt (2001): Temporal classification of mass movements on the Wellenkalk-scarp in Thuringia and the northern Hesse – possibilities and limitations. In: *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl. Bd* 125, p. 25 – 41.
- Bayard, M. & F.H. Schweingruber (1991): Ein Baumgrenzstandort: Das Wildwasser der Maggia im Tessin, Schweiz. Eine dendroökologische Studie. *Botanica Helvetica*, 101(1), p. 9 - 29.
- Bégin, Y. Langlais, D. & L. Cournoyer (1991b): A dendrogeomorphic estimate of shore erosion, upper St. Lawrence estuary, Quebec. *J. of Coastal Res.*, vol. 7, no. 3, p. 607-615.
- Bégin, Y., Langlais, D. & L. Cournoyer (1991a): Tree-Ring Dating of Shore Erosion Events (Upper St. Lawrence Estuary, Eastern Canada). *Geografiska Annaler*, 73A(1): 53-59.
- Bennett, M.E. (1904): Are roots aerotropic? In: *Botanical Gazette* 37, p. 241 – 260.
- Berlyn, G.P. & J.P. Miksche (1976): *Botanical Microtechnique and Cytochemistry*. The Iowa State University Press, Ames, Iowa, pp. 326.
- Beyer, I. & K.-H. Schmidt (1999): Untersuchungen zur Verbreitung von Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe im Raum nördlich von Rudolstadt (Thüringer Becken). In: *Hallenser Jahrbuch der Geowissenschaften*, A 21, p. 67 – 82.
- Bidwell, R.G.S. (1991): *Plant Physiology. A Treatise* (Steward, F.C. (Hrsg.). Volume X: Growth and Development. Academic Press, San Diego, pp. 572.
- Bigras, F.J. (1997): Root cold tolerance of black spruce seedlings: viability tests in relation to survival and regrowth. In: *Tree Physiology* 17, p. 311 – 318.
- Bjorkman, T. (1988): Perception of Gravity by Plants. In: *Advances in Botanical Research* 15, p. 1 – 41.
- Braam, R.R., Weiss, E.E.J. & A. Burrough (1987a): Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena* 14, p. 573 - 584.
- Braam, R.R., Weiss, E.E.J. & A. Burrough (1987b): Dendrogeomorphological analysis of mass movement: A technical note on the research method. – *Catena* 14, p. 585 - 589.

- Bräuning, A. (1995): Zur Anwendung der Dendrochronologie in den Geowissenschaften. In: Die Erde 126, p. 189 - 204
- Brunold, C., Rüeegg, A. & R. Brändle (Hrsg.) (1996): Stress bei Pflanzen: Ökologie, Physiologie, Biochemie, Molekularbiologie. Haupt, Bern. pp. 407.
- Burger, H. (1930): Bodenveränderung und Wurzelbildung. In: Schweizer Zeitschrift für Forstwesen 81, p. 67 – 71.
- Carrara, P.E. & T.R. Carroll (1979): The determination of erosion rates from exposed tree roots in the Piceance Basin, Colorado. Earth Surface Processes 4, p. 307 - 317.
- Caspar, T. & Pickard, B.G. (1989): Gravitropism in a starkless mutant of Arabidopsis. Implications for the stark-statolith theory of gravity sensing. In: Planta 177, p. 185 – 197.
- Chen, R., Rosen, E. & P.H. Masson (1999): Gravitropism in Higher Plants. In: Plant Physiology, Vol. 120, pp. 343 – 350.
- Cherubini, P., Schweingruber, F.H. & T. Forster (1997): Morphology and ecological significance of intra-annual radial cracks in living conifers. In: Trees 11, p. 216 – 222.
- Ciesielski, T. (1872): Untersuchungen über die Abwärtskrümmung der Wurzel. In: Beiträge zur Biologie der Pflanzen 1, p. 1 – 30.
- Costa, J. E. (1984): Physical Geomorphology of Debris Flow. In: Costa, J. E. & P. J. Fleisher (Hrsg.): Developments and Applications of Geomorphology.- Springer Verlag, Berlin, p. 268 - 317.
- Coutts, M.P., Nielsen, C.C.N. & B.C. Nicoll (1999): The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. In: Plant and Soil 217, p. 1 – 15.
- Curt, T., Lucot, E. & M. Bouchaud (2001): Douglas-fir root biomass and rooting profile in relation to soils in a mid-elevation area (Beaujolais Mounts, France). In: Plant and Soil 233, p. 109 – 125.
- Cutler, D.F. & I.B.K. Richardson (1989): Tree Roots and Buildings. 2<sup>nd</sup> Edition. Longman, Harlow, Essex.
- Cutler, D.F. (1976): Variation in Root Wood Anatomy. In: Leiden Botanical Series 3, p. 143 – 156.
- Cutler, D.F. (1978): Survey and Identification of Tree Roots. In: Arboricultural Journal 3, p. 243 – 246.
- Cutler, D.F. (1988): Kew after the Storm: New Research. In: The Biologist 35, p. 239 – 243.
- Cutler, D.F., Gasson, P.E. & M.C. Farmer (1989): The wind blown tree root survey: Preliminary results. In: Arboricultural Journal 13, p. 219 – 242.
- Cutler, D.F., Rudall, P.J., Gasson, P.E. & R.M.O. Gale (1987): Root Identification Manual of Trees and Shrubs. Chapman and Hall, London, pp. 245.
- 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. & T.W. Sewnam (Hrsg.): Tree Rings, Environment, and Humanity. Radiocarbon 1996, Proceedings of the international conference, Tucson, Arizona, 17-21 May 1994, Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, Arizona, p. 671–678.

- Darwin, C. (1880): *The Power of Movement in Plants*. John Murray, London.
- De Mattos, P.P., Seitz, R.A. & G.I. Bolzon de Muniz (1999): Identification of Annual Growth Rings Based on Periodical Shoot Growth. In: Wimmer, R. & R.E. Vetter (Hrsg.)(1999): *Tree-Ring Analysis. Biological, Methodological and environmental Aspects*. CABI Publishing, New York, p. 139-145.
- Desplanaque, C, Rolland, C. & F.H. Schweingruber (1999): Influence of species and abiotic factors on extreme tree ring modulation. In: *Trees* 13, p. 218 – 227.
- Dikau, R. (1988): Entwurf einer geomorphographisch-analytischen Systematik von Reliefeinheiten. *Heidelberger Geographische Bausteine*, Heft 5, Geographisches Institut, Universität Heidelberg, pp. 45.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. & M. Ibsen (Hrsg.) (1996a): *Landslide Recognition*. Wiley, Chichester, pp. 251.
- Dikau, R., Gärtner, H., Holl, B., Kienholz, H., Mani, P. & M. Zimmermann (1996b): Untersuchungen zur Murgangaktivität im Mattertal, Wallis, Schweiz. In: *INTERPRAEVENT 1996, Tagungspublikation Bd.1*, p.397 - 408.
- Douglass, A.E. (1914): A method of estimating rainfall by the growth of trees. In: Huntington, E. (Ed.): *The climatic factor*. Carnegie Institut Washington Publication 192, p. 101 – 122.
- Douglass, A.E. (1921): Dating our prehistoric ruins. In: *Natural History* 21(1), p. 27 – 30.
- Douglass, A.E. (1937): *Tree rings and chronology*. University of Arizona Bulletin 8(4), Physical Sciences Series 1.
- Douglass, A.E. (1941): Crossdating in Dendrochronology. *Journal of Forestry* 39. P. 825 – 831.
- Dunne, T., Dietrich, W.E. & J. Brunengo (1978): Recent and past erosion rates in semi-arid Kenya. In: *Zeitschrift für Geomorphologie N. F. Supplement Band 29*, p. 130 - 140.
- Eardley, A.J. (1967): Rate of denudation as measured by bristlecone pines, Cedar Breaks, Utah. In: *Utah Geological and Mineralogical Survey, Special Studies 21*, pp.13.
- Enstone, D.E. & C.A. Peterson (2001): Anatomy of seedling tap roots of loblolly pine (*Pinus taeda L.*). In: *Trees* 15, p. 98 – 111.
- Eskilsson, S. (1969): Fibre properties in the spruce root system. In: *Cellular Chemical Technologies* 3, p. 409 – 416.
- Esper, J. & H. Gärtner (2001): Interpretation of Tree-Ring Chronologies. In: *Erdkunde* 55 (3).
- Fayle, D.F.C. (1968): *Radial Growth in Tree Roots - Distribution, Timing, Anatomy*, Faculty of Forestry, University of Toronto, Technical Report 9, Toronto: pp.183.
- Fayle, D.F.C. (1975a): Extention and longitudinal growth during the development of red pine root systems. In: *Canadian Journal of Forest Research* 5, p. 109 – 121.
- Fayle, D.F.C. (1975b): Dimensions of the primary xylem in horizontal and vertical roots of red pine. In: *Canadian Journal of Forest Research* 5, p. 122 – 129.
- Fayle, D.F.C. (1975c): Distribution of radial growth during the development of red pine root systems. In: *Canadian Journal of Forest Research* 5, p. 608 – 625.

- Fayle, D.F.C. (1976): Stem sway affects ring width and compression wood formation in exposed root bases. In: *Forestry Science* 22, p. 193 – 194.
- Fritts, H.C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London, 567 pp.
- Gärtner, H. (1996): Untersuchungen zu Geschwindigkeit und Volumen von Murgängen im Mattertal, Wallis, Schweiz, in den Jahren 1993 und 1994 – Ein Beitrag zur Klimafolgen- und Naturgefahrenforschung. Dipl. Arbeit (unveröffentl.), Geographisches Institut, Universität Heidelberg, Heidelberg.
- Gärtner, H., Schweingruber, F.H. & R. Dikau (2001): Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. In: *Dendrochronologia* 19, p. 1 – 11.
- Gasson, P.E. & D.F. Cutler (1990): Root Anatomy of 17 Genera Growing in the British Isles. In: *IAWA Bulletin n.s.* 11 (1), p. 3 – 46.
- George, E., Seith, B., Schaeffer, Ch. & H. Marschner (1997): Responses of *Picea*, *Pinus* and *Pseudotsuga* roots to heterogeneous nutrient distribution in soil. *Tree Physiology*, 17: 39–45.
- Haeberli, W. & F. Naef (1988): Murgänge im Hochgebirge. In: *Die Alpen* 64 (4), p. 331 - 343.
- Haeberli, W. (1992): Possible effects of climatic change on the evolution of alpine permafrost. In: *Catena* 22, Suppl.-Bd., p. 23 - 35.
- Haper, J.L., Jones, M. & N.R. Sackville Hamilton (1991): The evolution of roots and the problems of analysing their behaviour. In: Atkinson, D. (Hrsg.): *Plant Root Growth. An Ecological Perspective*. Special Publication Number 10 of the British Ecological Society, Blackwell, Oxford, p.3 – 22.
- Hartig, R. (1869): Das Aussetzen der Jahrringe bei unterdrückten Stämmen. In: *Zeitung des Forstlichen Jagdwesens* 1, p. 471 – 476.
- Hartig, R. (1882): Ueber die Vertheilung der organischen Substanz, des Wassers und des Luftraumes in den Bäumen, und über die Ursache der Wasserbewegung in transpirierenden Pflanzen. Julius Springer, Berlin, 112 pp.
- Hartig, R. (1885): *Das Holz der deutschen Nadelwaldbäume*. Julius Springer, Berlin.
- Hartig, R. (1888): *Das Holz der Rothbuche in anatomisch-physiologischer, chemischer und forstlicher Richtung*. Julius Springer, Berlin, 238 pp.
- Hartig, Th. (1863): Über die Zeit des Zuwachses der Baumwurzel. In: *Botanische Zeitung* 21, p. 288 – 289
- Hartig, Th. (1878): *Anatomie und Physiologie der Holzpflanzen*. Julius Springer, Berlin, 412 pp.
- Hawes, M.C., Gunawardena, U., Miyasaka, S. & X. Zhao (2000): The role of root border cells in plant defense. In: *Trends in Plant Science* 5 (3), p. 128 - 133.
- Helley, E.J. & V.C. LaMarche (1968): December 1964, a 400-year flood in Northern California. In: *US Geological Survey Professional Paper* 600-D, p. D34 – D37.
- Hodick, D., Buchen, B. & A. Sievers (1998): Statolith Positioning by Microfilaments in *Chara* Rhizoids and Protonemata. In: *Advanced Space Research* 21 (8/9), p. 1183 – 1189.
- Holl, B. (1996): Untersuchungen zu Anrißgebieten und Auslösefaktoren von Murgängen im Mattertal, Wallis, Schweiz, in den Jahren 1993 und 1994 - Ein

- Beitrag zur Klimafolgen- und Naturgefahrenforschung. Dipl. Arbeit (unveröffentl.), Geographisches Institut, Universität Heidelberg, Heidelberg.
- Holzhauser, H.-P. (1987): Betrachtungen zur Gletschergeschichte. In: *Geographica Helvetica* 42, p. 80 – 91.
- Hopkins, W.G. (1995): *Introduction to Plant Physiology*. Wiley, New York, pp. 464.
- Huber, B. (1941): Aufbau einer mitteleuropäischen Jahrring-Chronologie. In: *Mitteilungen der Akademie der deutschen Forstwissenschaft* 1, p. 110 – 125.
- Huber, B. (1951): Mikroskopische Untersuchung von Hölzern. In: Freund, H. (Hrsg.): *Handbuch der Mikroskopie in der Technik V/I*, Umschau Verlag, Stuttgart, p. 79 – 192.
- Huber, B. (1961): *Grundzüge der Pflanzenanatomie. Versuch einer zeitgemässen Darstellung*. Springer, Berlin, pp. 243.
- IPCC (1996a): *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 878.
- IPCC (1996b): *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 448.
- Irvine, J.E. & R.H. Freyre (1961): Diageotropism in vanilla roots. In: *Science* 134, p. 56 – 57.
- Jackson, M.B. & P.W. Barlow (1981): Root Geotropism and the Role of Growth Regulators from the Cap: a Re-Examination. In: *Plant, Cell and Environment* 4, pp. 107 – 123.
- Johnsen, G. & K.-H. Schmidt (2000): Measurement of block displacement velocities on the Wellenkalk-scarp in Thuringia. In: *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl.-Bd.* 123, p. 93 110.
- Johnson, A. M. & J. R. Rodine (1984): Debris Flow.- in: Brunsden, D. & B. D. Prior: *Slope Instability*. John Wiley & Sons, Chichester, New York, p. 257 – 361.
- Kiss, J.Z., Hertel, R. & F.D. Sack (1989): Amyloplasts are necessary for full gravitropic sensitivity in roots of *Arabidopsis thaliana*. In: *Planta* 177, p. 198 – 206.
- Knight, T.A. (1806): On the direction of the radicle and germen during the vegetation of seeds. *Philosophical Transactions of the Royal Society London - Biological Science* 99, p. 108 – 120.
- Kny, L. (1877): Über das Dickenwachstum des Holzkörpers in seiner Abhängigkeit von äusseren Einflüssen. In: *Botanische Zeitung*, p. 416ff.
- Kny, L. (1908): Über das Dickenwachstum des Holzkörpers der Wurzeln in seiner Beziehung zur Lotlinie. In: *Deutsche Botanische Gesellschaft. Festschrift zum 25-jährigen Bestehen der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, p. 19 – 50.
- Konings, H. (1995): Gravitropism of Roots: an Evaluation of progress during the last three decades. In: *Acta Botanica Neerl* 44, p. 195 – 223.
- Kramer, P.J. & T.T. Kozlowski (1960): *Physiology of trees*. McGraw-Hill Book Company, New York, pp.642.

- Krämer, S., Miller, P.M. & L.E. Eddleman (1996): Root system morphology and development of seedling and juvenile *Juniperus occidentalis*. In: *Forest Ecology And Management* 86 (1-3), p. 229 - 240.
- Krause, C. & D. Eckstein (1993): Dendrochronology of roots. *Dendrochronologia* 11, p. 9-23.
- Krause, C. & H. Morin (1999): Root growth and absent rings in mature black spruce and balsam fir, Quebec, Canada. *Dendrochronologia* 16-17, p. 21-35.
- Kutschera, L. & M. Sobotnik (1992): *Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen*. DLG-Verlag.
- Kutschera, L., Sobotik, M. & E. Lichtenegger (1997): *Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen*. DLG-Verlag, pp. 331.
- LaMarche, V.C. & K.K. Hirschboeck (1984): Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. In: *Nature* 307, p. 121 – 141.
- LaMarche, V.C. & K.K. Hirschboeck (1985): Frost rings in trees and volcanic eruptions. In: *Nature* 313, p. 160 – 161.
- LaMarche, V.C. (1961): Rate of slope erosion in the White Mountains, California. *Geological Society of America Bulletin*, 72: 1579-1580.
- 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. (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. (1968): Rates of slope degradation as determined from botanical evidence, White Mountains, California. US Geological Survey Professional Paper, 352-I, pp.376.
- Lämmermayr, L. (1901): Beiträge zur Kenntnis der Heterotrophie von Holz und Rinde. In: *Kaiserliche Akademie der Wissenschaften. Sitzungsbericht der Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klausur, Abt.1*, 110, p. 29 – 62.
- Larcher, W. (1987): Stress bei Pflanzen. *Naturwissenschaften* 74, p. 158 – 167.
- Lepage H, Bégin Y, 1996. Tree-ring dating of extreme water level events at Lake Bienville, Subarctic Québec, Canada. *Arctic and Alpine Research*, Vol. 28, 1: 77–84.
- Levitt, J. (1972): *Responses of plants to environmental stress*. Academic Press, New York.
- Libbert, E. (1987): *Lehrbuch der Pflanzenphysiologie*. Gustav Fischer, Stuttgart, pp. 434
- Liese, W. & H.E. Dadswell (1959): Über den Einfluß der Himmelsrichtung auf die Länge von Holzfasern und Tracheiden. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 17. Jahrgang, Heft 11, p. 421 – 427.
- Liese, W. & U. Ammer (1962): Anatomische Untersuchungen an extrem drehwüchsigem Kiefernholz. In: *Holz als Roh- und Werkstoff* 20, p. 339 – 343.
- Lindström, A. & G. Rune (1999): Root deformation in plantations of container-grown Scots pine trees: effects on root growth, tree stability and stem straightness. In: *Plant and Soil* 217, p. 29 – 27.
- Lugon R. & M. Monbaron (1997): Stabilité des terrains meubles en zone de pergélisol et changements climatiques. Deux études de cas en Valais: Le Ritigraben (Mattertal)

- et la moraine du Dolent (Val Ferret). Rapport final PNR31. Zurich.
- Lyr, H. & V. Garbe (1995): Influence of root temperature on growth of *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica*, *Tilia cordata* and *Quercus rubor*. In: *Trees* 9, p. 220 - 223.
- Lyr, H. (1996): Effect of the root temperature on growth parameters of various European tree species. In: *Ann Sci For* 53, p. 317 - 323.
- Mäkinen, H. & P. Vanninen (1999): Effect of sample selection on the environmental signal derived from tree-ring series. In: *Forest Ecology and Management* 113, p. 83 - 89.
- Marin, P. & L. Fillion (1992): Recent dynamics of subarctic dunes as determined by tree-ring analysis of white spruce, Hudson Bay, Québec. *Quaternary Research*, 38: 316-330.
- Messerli, B., Grosjean, M., Hofer, T., Nùñez, L. & Ch. Pfister (2000): From nature-dominated to human-dominated environmental changes. In: *Quaternary Science Reviews* 19, p. 459 - 479.
- Molisch, H. (1884): Ueber die Ablenkung der Wurzeln von ihrer normalen Wachstumsrichtung durch Gase (Aerotropismus). In: *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft* 2, p. 160 - 169.
- Moore, R. & M.L. Evans (1986): How Roots Perceive and Respond to Gravity. In: *American Journal of Botany* 73 (4), pp. 574 - 587.
- Mückenhausen, E. (1982): die Bodenkunde und ihre geologischen, geomorphologischen und petrologischen Grundlagen. DLG-Verlag, Frankfurt a.M., pp. 579.
- Nicoll, B.C. & D. Ray (1996): Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. In: *Tree Physiology* 16, p. 891 - 898.
- Nilaweera, N.S. & P. Notalaya (1999): Role of tree roots in slope stabilisation. In: *Bulletin of Engineering Geology Environment* 57, p. 337 - 342.
- Norman, S.A., Schaetzl, R.J. & T.W. Small (1995): Effects of slope angle on mass movement by tree uprooting. In: *Geomorphology* 14, p. 19 - 27.
- Omeis, E. (1895): Untersuchungen des Wachstumsganges und der Holzbeschaffenheit eines 110 jährigen Kiefernbestandes. In: *Forstlich naturwissenschaftliche Zeitschrift* 4, p. 137 - 170.
- Onaka, F. (1949): Studies on Compression and Tension Wood. *Mokuzai Kenkyu Bulletin* 1, pp. 88.
- Patel, R.N. (1965): A comparison of the anatomy of the secondary xylem in roots and stems. In: *Holzforschung* 19, p. 72 - 79.
- Peterson, C.A., Enstone, D.E. & J.H. Taylor (1999): Pine root structure and its potential significance for root function. In: *Plant and soil* 217, p. 205 - 213.
- Pierson, T. C. & J. E. Costa (1987): A rheologic classification of subaerial sediment-water flows.- in: Costa, J. E., & G. F. Wieczorek: *Debris Flow / Avalanches: Process, Recognition and Mitigation*. In: *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology*, Vol. 7, p. 1 - 12.
- Pohl, F. (1927): ein Beitrag zur Abhängigkeit der Gefäßweite des Wurzelholzes von äusseren Faktoren. In: *Forstwissenschaftliches Zentralblatt*, p. 271 - 275
- Porterfield, D.M. & M.E. Musgrave (1998): The tropic response of plant roots to oxygen: oxytropism in *Pisum sativum* L.. In: *Planta* 206, Springer, p. 1 - 6.

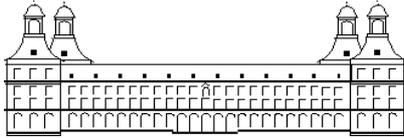
- Rashotte, A.M., Brady, S.R.B., Reed, R.C., Ante, S.J. & G.K. Muday (2000): Basipetal Auxin Transport is Required for Gravitropism in Roots of Arabidopsis. In: *Plant Physiology* 122, p. 481 – 490.
- Raven, P.H., Evert, R.F. & H. Curtis (1988): *Biologie der Pflanzen*. deGruyter, Berlin, 764 p.
- Reid, D.M., Beall, F.D. & R.P. Pharis (1991): Environmental Cues in Plant Growth and Development. In: Steward, F.C. (Ed.) (1991): *Plant Physiology. A Treatise*. Vol. X, Bidwell, R.G.S. (Ed.): *Growth and Development*. Academic Press, San Diego, p. 65 – 178.
- Richardson, S.D. (1964): The External Environment and Tracheid Size in Conifers. In: Zimmermann, R.H. (Hrsg.): *The formation of wood in Forest Trees*. Academic Press, New York, p. 367 – 388.
- Richter, G. (Hrsg.) (1998): *Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, pp. 264.
- Riedl, H. (1937): Bau und Leistungen des Wurzelholzes. In: *Jahrbuch der wissenschaftlichen Botanik* 85, p. 1 – 75.
- Robards, A. (Hrsg.) (1985): *Botanical Microscopy*. Oxford University Press, Oxford, pp. 368.
- Roberts, J.A. & R. Hooley (1988): *Plant Growth Regulators*. Series „Tertiary Level Biology“, Blackie, Glasgow/London; Chapman and Hall, New York, pp. 190.
- Roberts, L.W., Gahan, P.B. & R. Aloni (1988): *Vascular Differentiation and Plant Growth Regulators*. Springer series in wood science, Springer, New York, pp. 154.
- Rosen, E., Chen, R. & P.H. Masson (1999): Root gravitropism: a complex response to a simple stimulus? In: *Trends in Plant Science Reviews*, Vol. 4, No. 10, p. 407 – 412.
- Ruhland, W. (1956): *Encyclopedia of Plant Physiology*. Vol. III. Springer, Heidelberg, p. 173 – 187.
- Russell, R.S. (1977): *Plant root systems: Their function and interaction with the soil*. McGraw-Hill, Maidenhead, England, pp. 298.
- Salisbury, F.B. & C.W. Ross (1992): *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Company, Belmont, California, pp. 207.
- Sammett, R. (1905): Untersuchungen über Chemotropismus und verwandte Erscheinungen bei Wurzeln, Sprossen und Pilzfäden. In: *Jahrbuch der Wissenschaftlichen Botanik* 41, p. 611 – 650.
- Sanio, K. (1872): Über die Größe der Holzzellen bei der gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*). In: *Pringsh. Jahrbuch für wissenschaftliche Botanik* 8, p. 401 – 420.
- Sanio, K. (1873): Anatomie der gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris*). In: *Pringsh. Jahrbuch für wissenschaftliche Botanik* 9, p. 50 – 64.
- Schacht, H. (1860): *Der Baum. Studien über Bau und Leben der hölzernen Gewächse*. Müller, Berlin, 378 p.
- Schmid, E. (1998): Atlas der Schweiz, Tafel 17, Vegetation. In: *Internetatlas der Schweiz*, URL: <http://www.karto.ethz.ch/neumann/atlas/>.
- Schmidt, K.-H. & I. Beyer (2001): Factors controlling mass movement susceptibility on the Wellenkalk-scarp in Hesse and Thuringia. In: *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl.-Bd.* 125, p. 43 – 63.

- Schultze-Dewitz, G. (1965): Variation und Häufigkeit der Faserlänge der Kiefer. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 23. Jahrgang, Heft 3, p. 81 - -86.
- Schwarz, F. (1892): Forstliche Botanik. Parey, Berlin, 513 p.
- Schweingruber, F.H. (1978): Mikroskopische Holzanatomie. Formenspektren mitteleuropäischer Stamm- und Zweighölzern zur Bestimmung von rezentem und subfossilem Material. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf (Hrsg.), Zürcher AG, Zug, pp. 215.
- Schweingruber, F.H. (1978): Mikroskopische Holzanatomie. Swiss Federal Institute of Forestry Research, Birmensdorf, pp.215.
- Schweingruber, F.H. (1983): Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Haupt, Bern, pp. 234.
- Schweingruber, F.H. (1990): Anatomie Europäischer Hölzer. Haupt, Bern, pp. 800.
- Schweingruber, F.H. (1990): Anatomie europäischer Hölzer: ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum-, Strauch- und Zwergstrauchhölzer. Anatomy of european woods. Hrsg.: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. Bern, Haupt, pp. 800.
- Schweingruber, F.H. (1996): Tree Rings and Environment. Dendroecology. Haupt, Bern. 609 pp.
- Schweingruber, F.H. (2001): Dendroökologische Holzanatomie. Haupt, Bern, pp. 554.
- Schweingruber, F.H., Kairiukstis, L. & S. Shiyatov (1990): Sample selection. In: Cook, E.R. & L. Kairiukstis (Hrsg.): Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Kluwer, Dordrecht, p. 23 – 25.
- Selye, H. (1936): A syndrome produced by various nocuous agents. In: Nature 138, p. 32 – 34.
- Shroder, J.F. (1980): Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating. Progress in Physical Geography, 4: 161-188.
- Sievers, A., Buchen, B. & D. Hodick (1996): Gravity sensing in tip-growing cells. In: Trends in Plant Science Reviews 1 (8), p. 273 –279.
- Sigafoos, R.H. (1964): Botanical evidence of floods and floodplain deposition. US Geological Survey Professional Paper 485-A, pp.35.
- Sitte, P., Ziegler, H., Ehrendorfer, F. & A. Bresinsky (Hrsg.) (1998): Strasburgers Lehrbuch der Botanik. Fischer, Stuttgart, pp. 1007.
- Stattin, E. & A. Lindström ( 1999): Influence of soil temperature on root freezing tolerance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings. In: Plant and Soil 217, p. 173 – 181.
- Stokes, A. (2000): Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. At different ages and tree growth response to wind-induced root movement. In: Plant and Soil 217, p. 17 – 27.
- Stokes, M.A. & T.L.Smiley (1968): An Introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago, pp. 73.
- Strunk, H. (1989a): Dendrogeomorphology of debris flows. Dendrochronologia 7, p. 15-25
- Strunk, H. (1989b): Episodische Murschübe in den Pragser Dolomiten - semiquantitative Erfassung von Frequenz und Transportmenge. Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 70, S. 163-186

- Strunk, H. (1990): Murgänge als Naturgefahren - Frequenzanalysen mit dendrochronologischen Methoden. In: Semmel, A. (Hrsg.): 47. Deutscher Geographentag Saarbrücken 1989, Tagungsberichte u. wissenschaftliche Abhandlungen
- Strunk, H. (1991): Frequency distribution of debris flow in the Alps since the "Little Ice Age". *Z. Geomorph. N. F., Suppl.-Bd.* 83, p. 71-81
- Strunk, H. (1995): Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Murfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung. *Theorie und Forschung*, Bd. 317; *Geographie*, Bd. 1. Roderer Verlag, Regensburg, pp. 196.
- Sutinen, M.L., Holappa, T., Ritari, A. & K. Kujala (1999): Seasonal changes in soil temperature and snow-cover under different simulated winter conditions: Comparison with frost hardiness of Scots pine (*Pinus sylvestris*) roots. In: *Chemosphere: Global Change Science* 1, p. 485 – 492.
- Taiz, L. & E. Zeiger (1998): *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, Massachusetts, pp. 792.
- Takahashi, H. & T.K. Scott (1991): Hydrotropism and its interaction with gravitropism in maize roots. In: *Plant Physiology* 96, p. 558 – 564.
- Tasaka, M., Kato, T. & H. Fukaki (1999): The Endodermis and Shoot Gravitropism. In: *Trends in Plant Science* 4, p. 103 – 107.
- Taylor, J.H. & C.A. Peterson (2000): Morphometric analysis of *Pinus banksiana* Lamb. root anatomy during a 3-month field study. *Trees* 14(5): 239-247.
- Tessier, L., Guibal, F. & F.H. Schweingruber (1997): Research Strategies in Dendroecology and Dendroclimatology in Mountain Environments. In: *Climatic Change* 36, p. 499 – 517.
- Thomas, F.M. & C. Hilker (2000): Nitrate reduction in leaves and roots of young pedunculate oaks (*Quercus robur*) growing on different nitrate concentrations. *Environmental And Experimental Botany*, 43(1): 19-32.
- Timell, T.E. (1986): *Compression Wood in Gymnosperms* 2, Springer, Kapitel *Compression Wood in Roots*, p. 930 – 946.
- Torrey, J.G. & D.T. Clarksson (1975): The development and function of roots. Third Cabot Symposium. Academic Press, pp. 618.
- Varnes, D. J. (1978): Slope Movement. Types and Processes. In: Schuster, R. L. & R. J. KRIZEK (ed.): *Landslides. Analysis and Control*.- National Research Council, Transportation Research Board, Special Report 176, Washington D. C., p. 11 - 33.
- von Guttenberg, H. (1961): Grundzüge der Histogenese höherer Pflanzen II. Die Gymnospermen. *Handbuch der Pflanzenanatomie, spezieller Teil*, Band VIII, Teil 4, Borntraeger, Berlin, pp. 172.
- von Guttenberg, H. (1968): Der primäre Bau der Angiospermenwurzel. *Handbuch der Pflanzenanatomie, spezieller Teil*, Band VIII, Teil 5, Borntraeger, Berlin, pp. 472.
- von Mohl, H. (1862): Einige anatomische und physiologische Bemerkungen über das Holz der Baumwurzeln. In: *Botanische Zeitung* 20.
- Watson, A. (2000): Wind-induced forces in the near-surface lateral roots of radiata pine. In: *Forest Ecology and Management* 135, p. 133 – 142.
- Watson, A., Phillips, C. & M. Marden (1999): Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability. In: *Plant and Soil* 217, p. 39 – 47.

- Weber, H. (1955): Einführung in die Geologie Thüringens. Berlin, pp. 201.
- Weber, U. (1995): Ecological pattern of larch budmoth (*Zeiraphera diniana*) outbreaks in the central swiss alps. In: *Dendrochronologia* 13, p. 11 - 31.
- Westing, A.H. (1965): Formation and function of compression wood in gymnosperms II. In: *Botanical reviews* 34, p. 51 – 78.
- Whittington, W.J. (Hrsg.) (1969): Root growth. Butterworth, London, pp. 450.
- Wieler, A. (1891): Ueber die Beziehung zwischen Wurzel- und Stammholz. In: *Forstliches Jahrbuch*, p. 143 – 171.
- Wilson, B.F. (1967): Root growth around barriers. In: *Botanical Gazette* 128, p. 79 – 82.
- Wilson, B.F. (1970): *The growing tree*. University of Maryland Press, Amherst, pp. 152.
- Wimmer, R. & R.E. Vetter (Hrsg.)(1999): *Tree-Ring Analysis. Biological, Methodological and environmental Aspects*. CABI Publishing, New York, pp. 302.
- Yamaguchi, D.K., Atwater, B.F., Bunker, D.E., Benson, B.E. & M.S. Reid (1997): Tree-ring dating the 1700 Cascadia earthquake. In: *Nature* 389, p. 922 – 923.
- Yoshida, T. (1960): On the growth rings found in the root of *Sargassum ringgoldianum* Harvey (Fucales). *Jap. Soc. Sci. Fisheries Bulletin* 26 (7), p. 673 – 678.
- Zhou, Y., Watts, D., Cheng, X., Li, Y., Luo, H. & Q. Xiu (1997): The traction effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on soil reinforcement: a direct in situ test. In: *Plant and Soil* 190, p. 77 – 86.
- Zhou, Y., Watts, D., Li, Y. & X. Cheng (1998): A case study of effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on shallow soil reinforcement. In: *Forest Ecology and Management* 103, p. 107 – 120.
- Zimmermann, M & W. Haeberli (1992): Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas – A case study in the Swiss Alps. In: *Catena, Suppl.-Bd.* 22, p. 59 - 72.
- Zimmermann, M. (1994): Murgänge im Dorfbach von Randa (VS). In: *Wasser, Energie, Luft* 86 (1/2), Baden, p. 17 - 21.
- Zimmermann, M., Mani, P. & P. Gamma (1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. *Schlußbericht des NFP 31*. Vdf-Verlag, Zürich, pp. 161.

Baum-ID	Baumart	Wurzeln	Dünn- schnitte	Lokalität	Freilegung (Anzahl der Wurzeln)		
					S	K	N
<b>Murrinne</b>							
HCB0101	Larix decidua	1	4	Birchbach	1		
HCB0102	Larix decidua	2	1	Birchbach		1	1
HCN0101	Larix decidua	1	1	Bruchi			1
HCN0102	Larix decidua	1	1	Bruchi		1	1
HCR0101	Larix decidua	1	4	Ritigrabe	1		
HCR0201	Larix decidua	2	M	Ritigrabe		1	1
HCT0101	Larix decidua	1	M	Täschgufer	1		
HCT0401	Larix decidua	2	2	Täschgufer		1	1
HCT0402	Larix decidua	2	M	Täschgufer			1
HCW0201	Larix decidua	4	M	Wildibach	1	1	2
<b>Murkegel</b>							
HCW0101	Larix decidua	1	2	Wildibach		1	
HCW0102	Larix decidua	1	1	Wildibach			1
HCW0103	Larix decidua	1	2	Wildibach			1
HCW0104	Larix decidua	1	2	Wildibach		1	
HCG0101	Picea abies	1	4	Grosse Grabe			1
HCG0102	Larix decidua	1	2	Grosse Grabe		1	
HCG0103	Picea abies	1	1	Grosse Grabe		1	
HCG0104	Picea abies	1	M	Grosse Grabe			1
HCG0106	Picea abies	1	M	Grosse Grabe			1
<b>Lawinenbahn</b>							
HCL0101	Larix decidua	3	10	Brändijtälli	1	1	1
HCL0102	Larix decidua	3	3	Brändijtälli		2	1
HCL0301	Pinus cembra	3	1	Brändijtälli		2	1
HCL0302	Pinus cembra	3	M	Brändijtälli		2	1
HDR0301	Picea abies	2	M	Reintal			2
HDR0302	Picea abies	1	M	Reintal	1	2	
HDR0303	Picea abies	2	M	Reintal			1
HDR0304	Picea abies	1	M	Reintal		1	
<b>Böschung</b>							
HCT_L1	Larix decidua	1	1	Wanderweg bei Gruben	1		
HCT_L2	Larix decidua	1	1	Wanderweg bei Gruben		1	
HCH0201	Larix decidua	1	M	Hungerlitälli, Wanderweg			1
HCH0203	Larix decidua	1	1	Hungerlitälli, Wanderweg	1		
HCH0202	Pinus cembra	1	2	Hungerlitälli, Wanderweg	1		
HCH0204	Pinus cembra	1	M	Hungerlitälli, Wanderweg			1
HCS0101	Picea abies	2	4	Strasse vor Riedbach	1		1
HCS0102	Picea abies	3	6	Strasse vor Riedbach	1	1	1
HCS0102	Picea abies	3	6	Strasse vor Riedbach	1	2	
HCS0103	Larix decidua	1	1	Strasse vor Riedbach		1	
HDR0201	Picea abies	1	M	Reintal, Wanderweg	1		
<b>Hanglage</b>							
HCA0101	Picea abies	1	M	Lötschental, Gassenried		1	
HCL0201	Pinus cembra	3	2	Brändijtälli		2	1
HCL0202	Pinus cembra	2	3	Brändijtälli		1	1
HCH0101	Pinus cembra	4	3	Hungerlitälli	1	2	1
<b>Schichtstufe</b>							
HDG0101	Larix decidua	3	3	Kammerlöcher	1	2	
HDS0101	Picea abies	2	2	Kammerlöcher	2		
HDG0102	Pinus sylvestris	1	3	Kammerlöcher	1		
HDG0103	Pinus sylvestris	2	3	Kammerlöcher	1	1	
HDG0104	Pinus sylvestris	1	1	Kammerlöcher	1		
<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>79</b>	<b>83</b>		<b>20</b>	<b>33</b>	<b>26</b>
M: nur makroskopische Auswertung; S: schnelle Freilegung; K: kontinuierliche Freilegung; N: nicht freigelegt							



**Dendrogeomorphologie**  
(Wurzelanalyse)

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

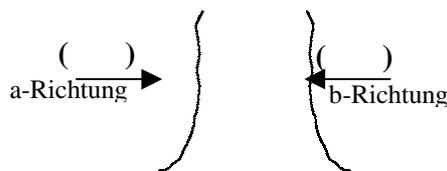
<b>Projekt:</b>		<b>Großform</b>	
<b>Sachbearbeiter:</b>		<b>Lokalform</b>	
<b>Datum:</b>		<b>Höhe/Neigung/Exposition</b>	
<b>Gebiets-ID:</b>		<b>Bestandesdichte</b>	
<b>Lokalität:</b>		<b>Bodenvegetation:</b>	

**Baumdaten**

<b>Baum ID</b>			
<b>Baumart</b>	<b>Baumhöhe</b>	<b>Bohrhöhe</b>	<b>Umfang in Bohrhöhe</b>
<b>Bohrkern ID (a-Richtung)</b>			
<b>Kernverlust / Fäule / Mark</b>			
<b>Bohrkern ID (b-Richtung)</b>			
<b>Kernverlust / Fäule / Mark</b>	/	/	/
<b>Bem. zum Standort</b>			
<b>Bem. zur Art der Wurzelfreilegung</b>			

**Skizze der freigelegten Wurzelzone:**

(+ Lage der Wurzelproben)



a+b je hangparallel

Wurzeldaten

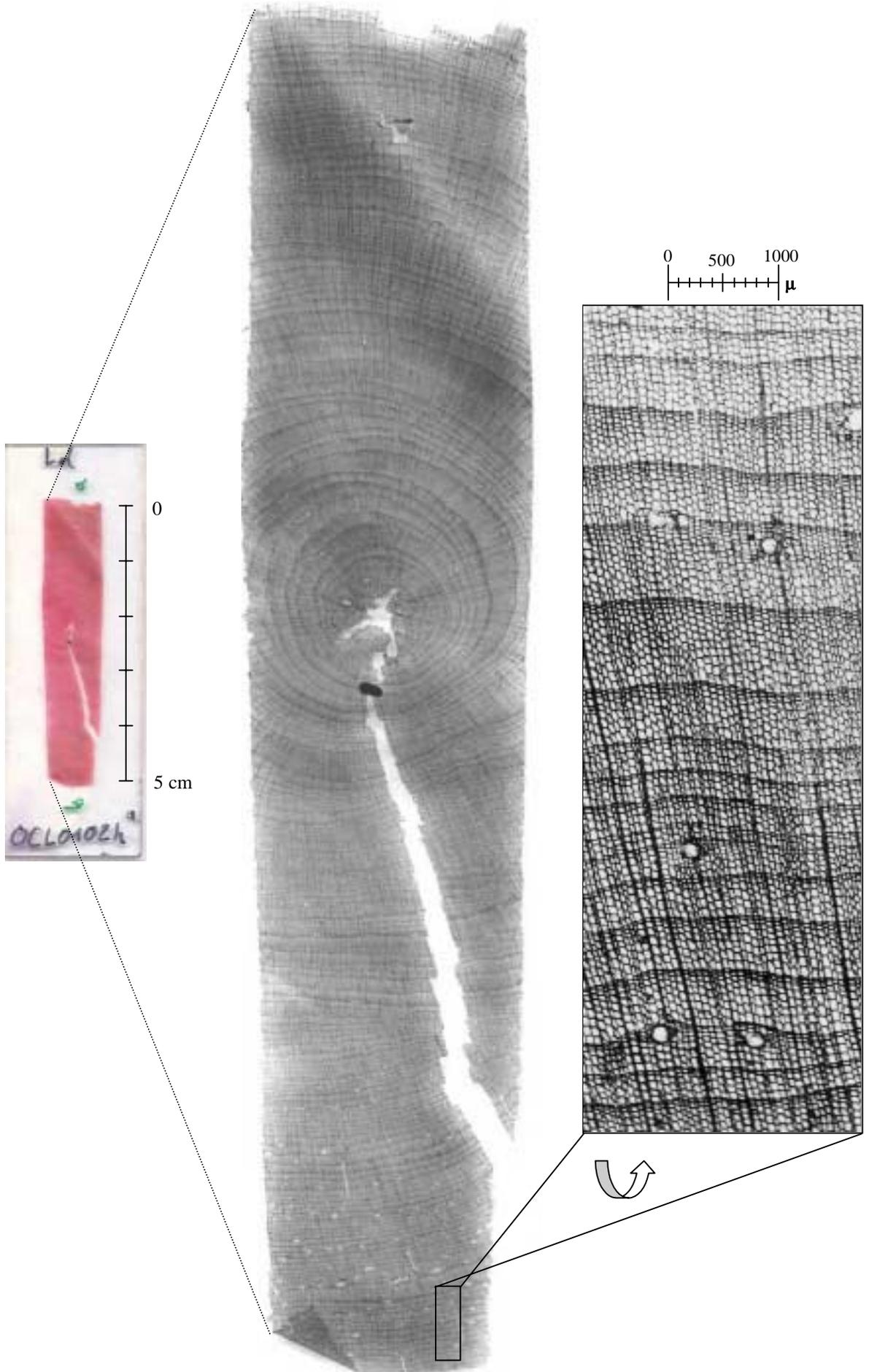
SS=Stammseite

SaS= Stammabgewandte Seite

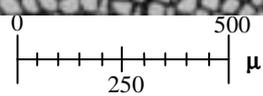
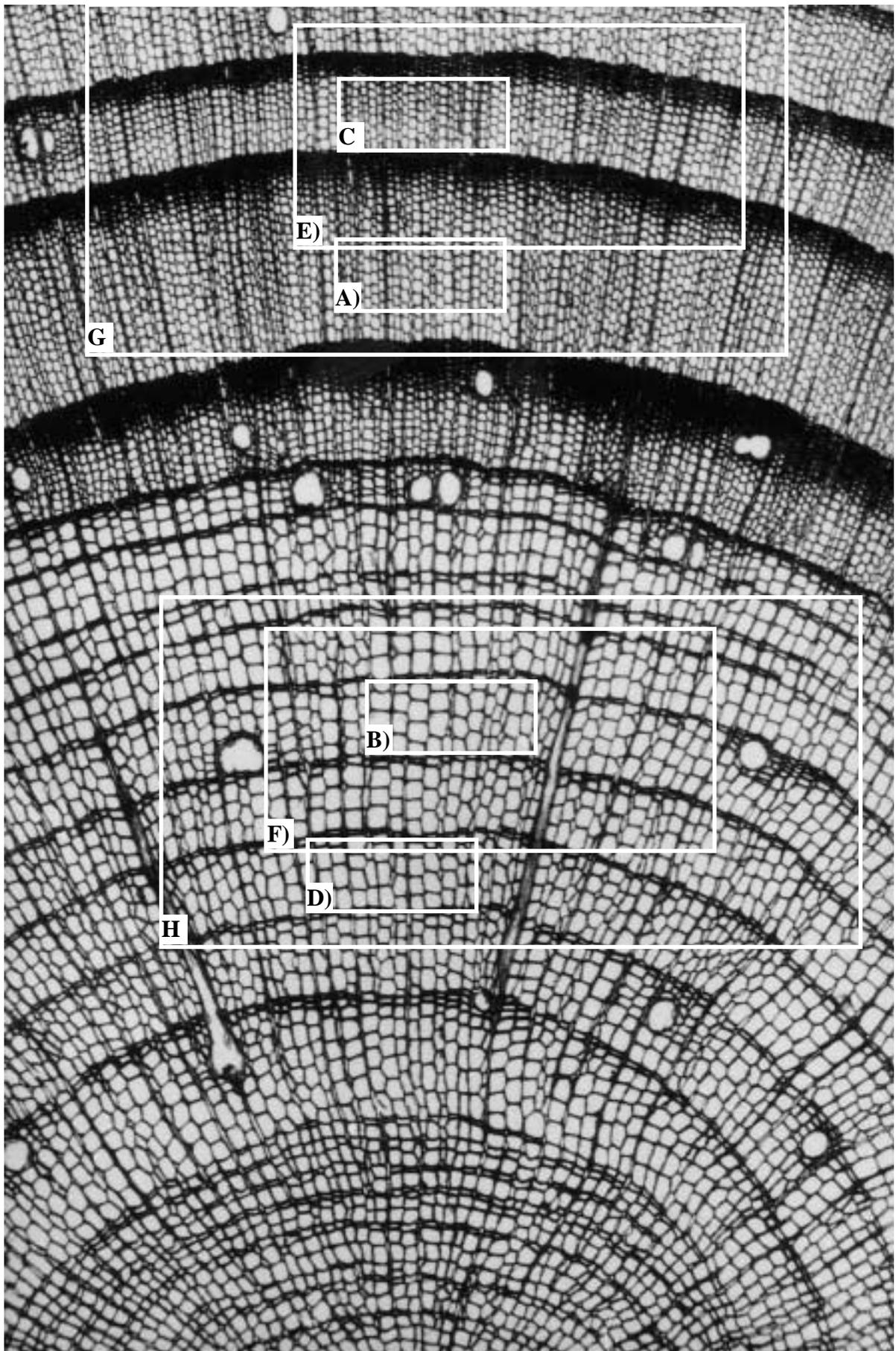
<b>Baum ID</b>	
<b>Wurzel ID</b>	
<b>Wuchsrichtung</b>	
<b>Entf. Probe SS zum Stamm</b>	
<b>Länge der Probe</b>	
<b>SS WurzelOK - Boden</b>	
<b>SS WurzelUK - Boden</b>	
<b>SaS WurzelOK - Boden</b>	
<b>SaS WurzelUK - Boden</b>	

<b>Baum ID</b>	
<b>Wurzel ID</b>	
<b>Wuchsrichtung</b>	
<b>Entf. Probe SS zum Stamm</b>	
<b>Länge der Probe</b>	
<b>SS WurzelOK - Boden</b>	
<b>SS WurzelUK - Boden</b>	
<b>SaS WurzelOK - Boden</b>	
<b>SaS WurzelUK - Boden</b>	

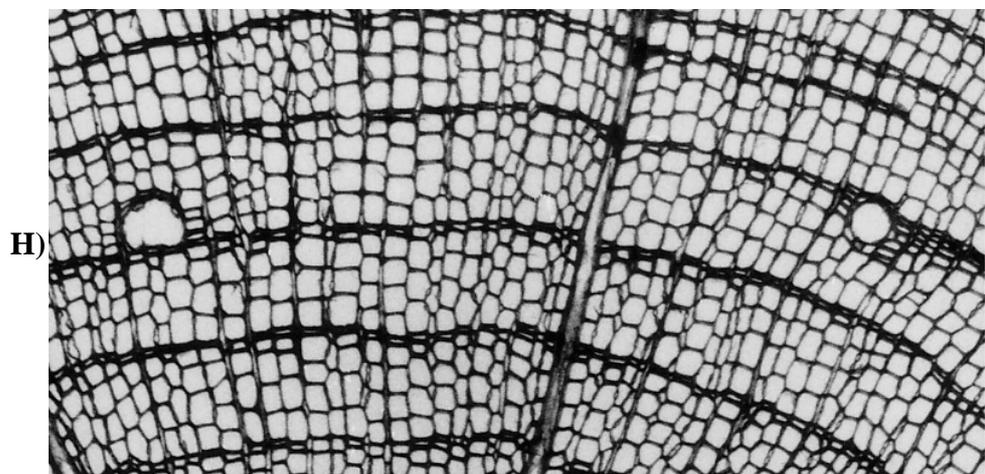
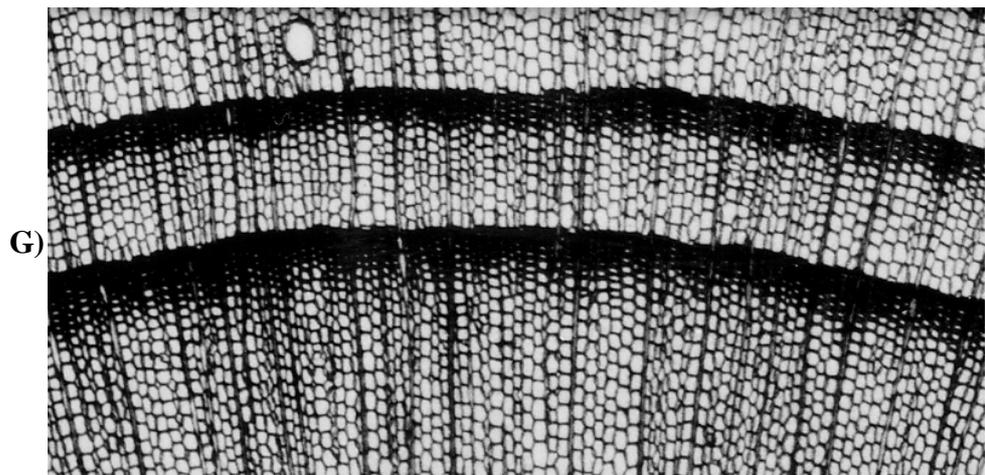
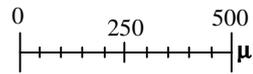
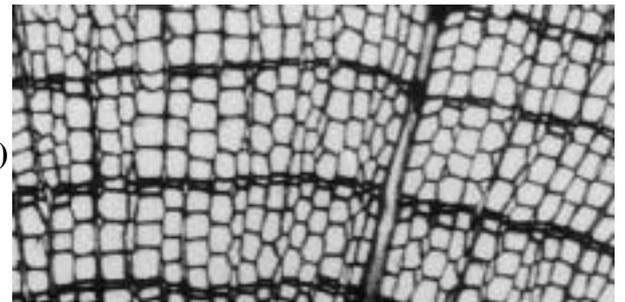
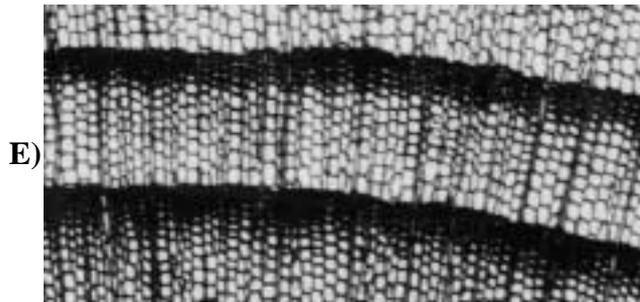
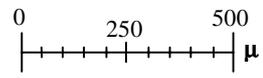
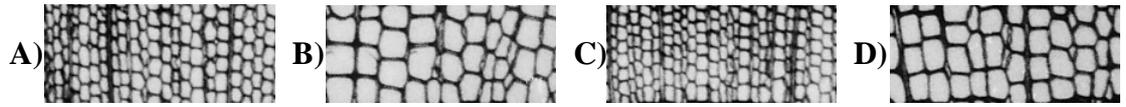
<b>Baum ID</b>	
<b>Wurzel ID</b>	
<b>Wuchsrichtung</b>	
<b>Entf. Probe SS zum Stamm</b>	
<b>Länge der Probe</b>	
<b>SS WurzelOK - Boden</b>	
<b>SS WurzelUK - Boden</b>	
<b>SaS WurzelOK - Boden</b>	
<b>SaS WurzelUK - Boden</b>	



*Larix decidua* (50-fach) 2CB0101f

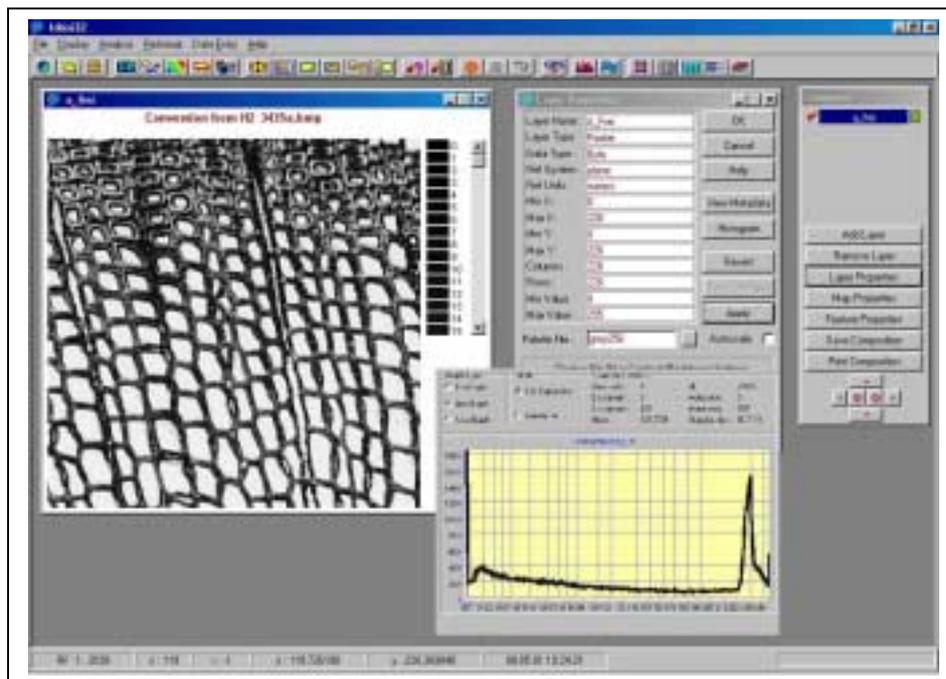


Ausschnitte aus 2CB0101f zur Pixelanalyse



Ausschnitte:	Freigelegt: A C E G	Nahe Oberfläche: B D F H
--------------	---------------------	--------------------------

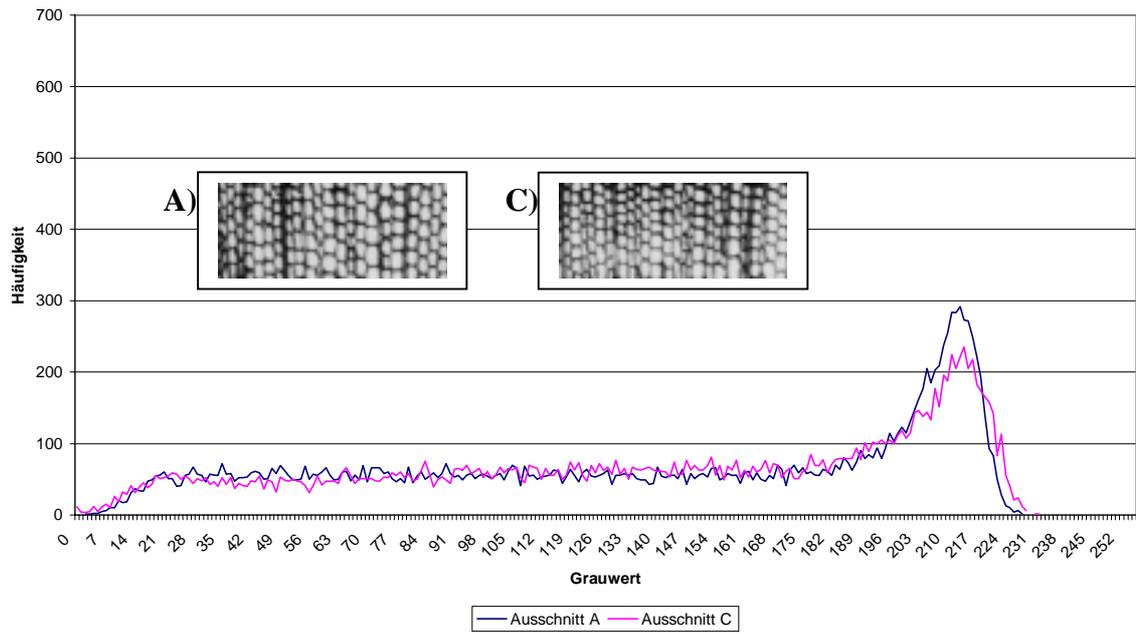
IDRISI Auswertungsbeispiel



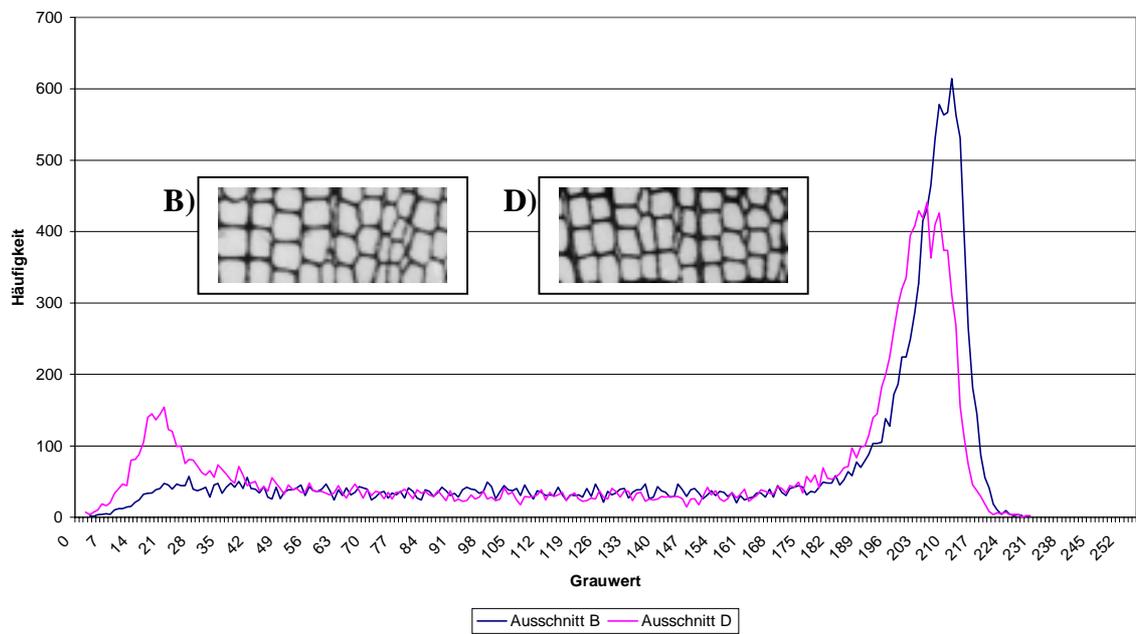
Histogram of f

Class	Lower Limit	Upper Limit	Frequency	Prop.	Cum. Freq.	Cum. Prop.
0	0.0000	0.9999	14	0.0001	14	0.0001
1	1.0000	1.9999	8	0.0001	22	0.0002
2	2.0000	2.9999	16	0.0001	38	0.0003
3	3.0000	3.9999	48	0.0003	78	0.0006
4	4.0000	4.9999	24	0.0002	102	0.0008
5	5.0000	5.9999	55	0.0004	157	0.0013
6	6.0000	6.9999	64	0.0005	221	0.0018
7	7.0000	7.9999	94	0.0008	315	0.0025
8	8.0000	8.9999	97	0.0008	412	0.0033
9	9.0000	9.9999	162	0.0011	574	0.0045
10	10.0000	10.9999	178	0.0014	732	0.0059
11	11.0000	11.9999	304	0.0024	1036	0.0083
12	12.0000	12.9999	263	0.0023	1319	0.0106
13	13.0000	13.9999	424	0.0034	1743	0.0140
14	14.0000	14.9999	554	0.0045	2297	0.0185
15	15.0000	15.9999	688	0.0055	2985	0.0240
16	16.0000	16.9999	828	0.0066	3813	0.0306
17	17.0000	17.9999	947	0.0076	4760	0.0382
18	18.0000	18.9999	1806	0.0083	5786	0.0466
19	19.0000	19.9999	1324	0.0098	6912	0.0556
20	20.0000	20.9999	1805	0.0081	7917	0.0637
21	21.0000	21.9999	1808	0.0084	8955	0.0721
-	-	-	-	-	-	-
254	254.0000	254.9999	0	0.0000	124254	1.0000
255	255.0000	255.9999	1	0.0000	124251	1.0000
Class width	-	1.0000				
Display minimum	-	0.0000				
Display maximum	-	255.0000				
Actual minimum	-	0.0000				
Actual maximum	-	255.0000				
Mean	-	145.9332				
Stand. Deviation	-	79.2978				
#	-	124254				

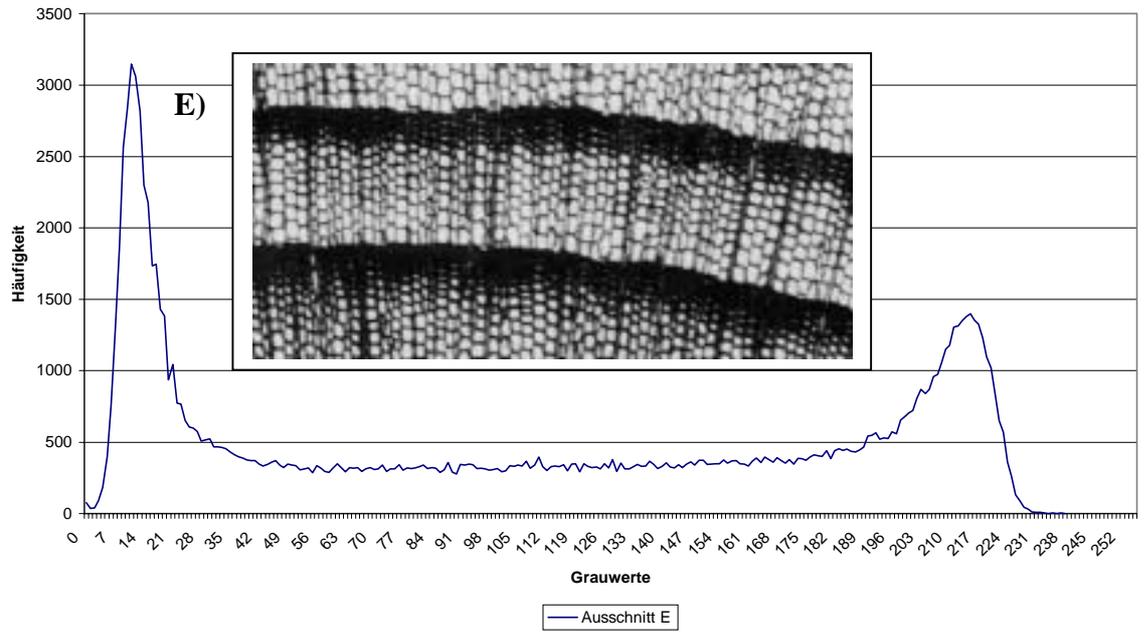
Anteil Graustufen Ausschnitte A und C (freigelegt)



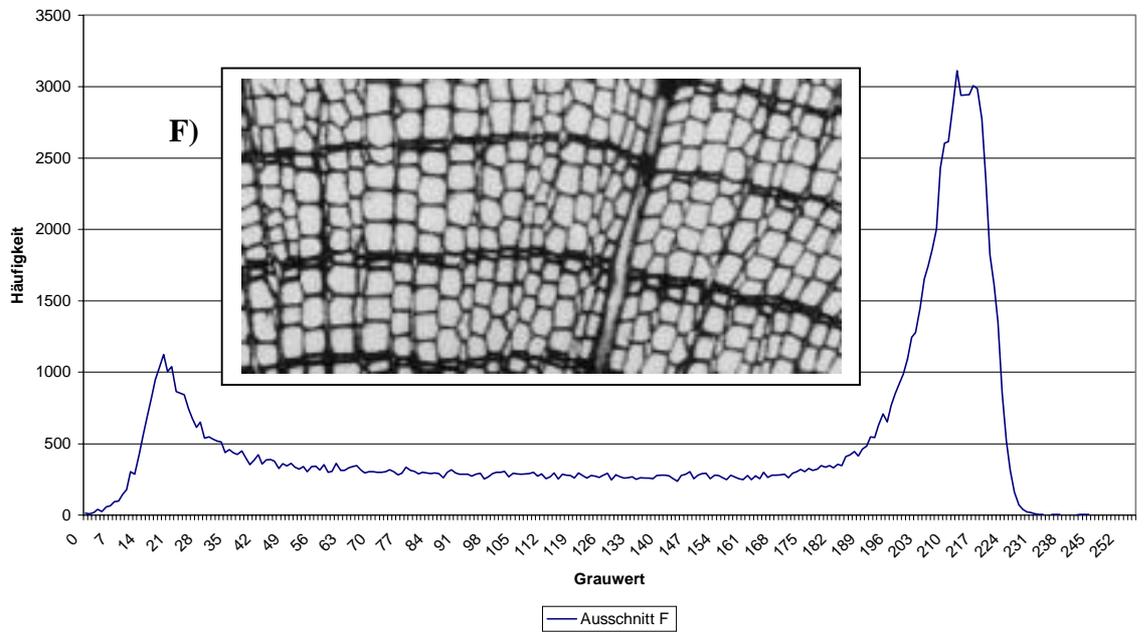
Anteil Graustufen Ausschnitte B und D (nicht frei)

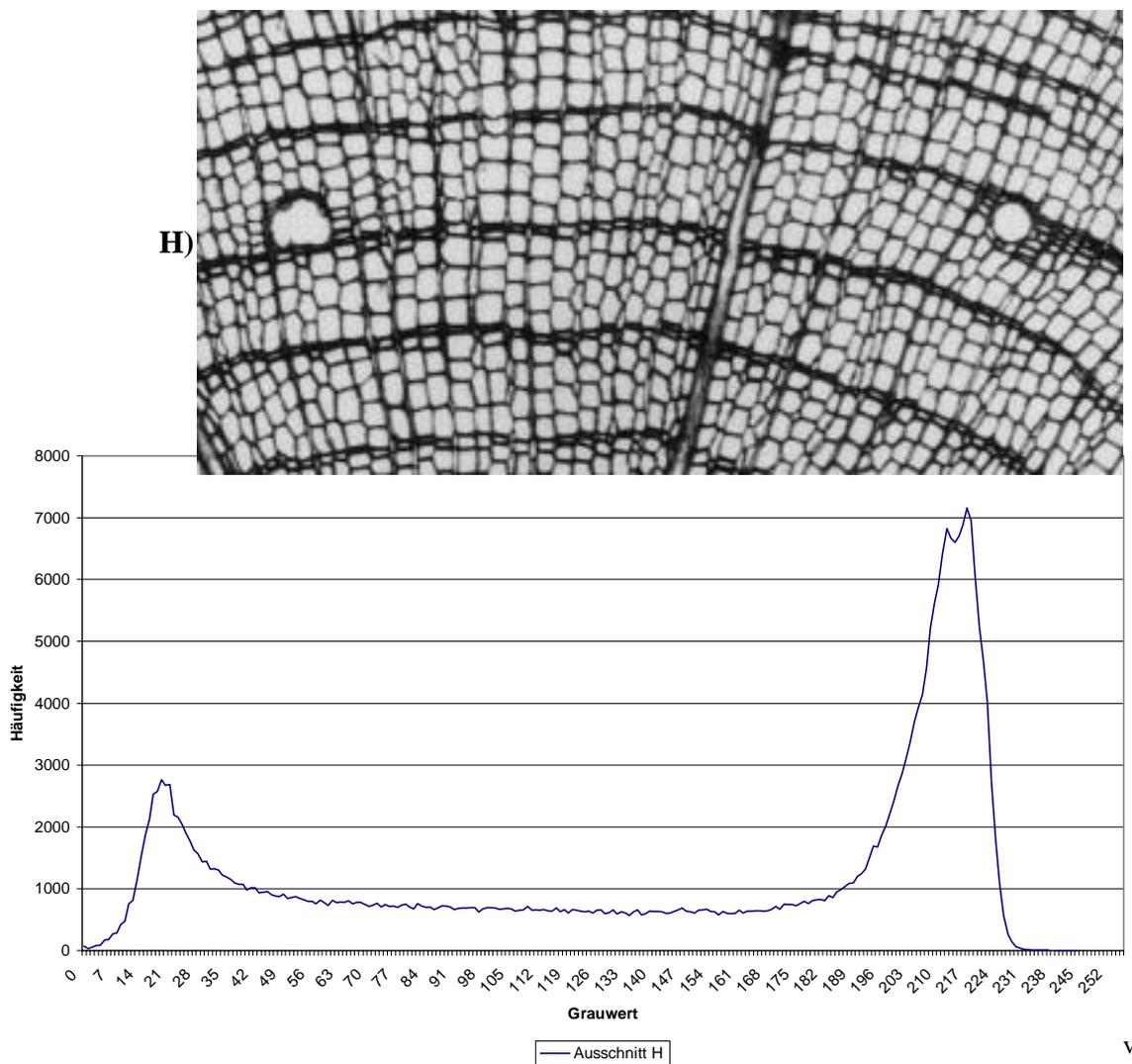
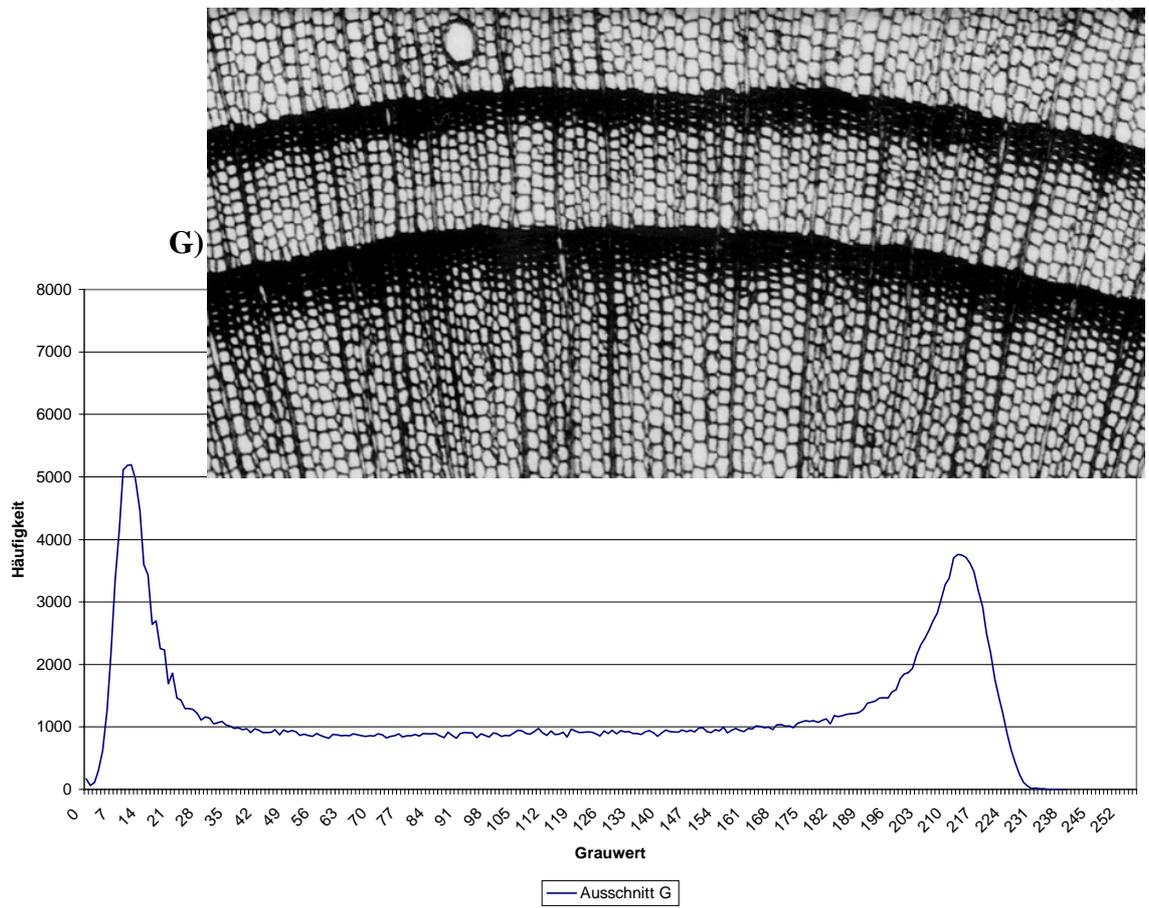


Anteil Graustufen Ausschnitt E (freigelegt)



Anteil Graustufen Ausschnitt F (nicht frei)





## Publikationen

- GÄRTNER, H., SCHWEINGRUBER, F.H. & R. DIKAU (2001): Determination of erosion rates by analysing structural changes in the growth pattern of exposed roots. In: *Dendrochronologia* 19, p. 81 – 91.
- GÄRTNER, H.: Anatomical features of exposed roots - A new methodology in dating erosion events. In Vorbereitung.
- GERS, E., FLORIN, N., GÄRTNER, H., GLADE, T., DIKAU, R. & F.H. SCHWEINGRUBER (2001): The application of shrubs for dendrogeomorphological analysis to reconstruct spatial and temporal landslide movement patterns. A preliminary study. In: *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl.* 125, p. 163 – 175.
- ESPER, J. & H. GÄRTNER (2001): Interpretation of Tree-Ring Chronologies. In: *Erdkunde* 55 (3).
- GÄRTNER, H. & A. BERGMANN (1999): Object-oriented modeling of data sources as a tool for the integration of heterogeneous paleoecological information. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Geocomputation, Mary Washington College, Fredericksburg, Virginia, July 25-28, 1999. Full paper:-- Proceedings GEOCOMPUTATION 99*
- GÄRTNER, H., BERGMANN, A., BREUNIG, M., CREMERS, A.B. & R. DIKAU (2000): OPALIS - An Open Paleoecological Information System. In: *GIS - Zeitschrift für raumbezogene Information und Entscheidungen. Vol. 13, No.2/2000*, pp. 6-11.
- GÄRTNER, H., BERGMANN, A. & J. SCHMIDT (2001): Object-Oriented Modeling of Data Sources as a Tool for the Integration of Heterogeneous Geoscientific Information. In: *Computers and Geosciences, Vol 27/8*, p. 975 - 985.
- BERGMANN, A., GÄRTNER, H., BREUNIG, M., CREMERS, A.B. & R. DIKAU (1998): Design and first steps in the development of OPALIS. In: *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 32, Part 4, ISPRS Commission IV - GIS Between Visions and Applications*, pp. 52-58.
- BERGMANN, A., GÄRTNER, H., BREUNIG, M., CREMERS, A.B. & R. DIKAU (1999): Integrierter Zugriff auf heterogene paläoökologische Datenbestände. In: *Rautenstrauch, C. & M. Schenk (Hrsg.): Umweltinformatik 99. Umweltinformatik zwischen Theorie und Industrieanwendung. 13. Internationales Symposium Informatik für den Umweltschutz der Gesellschaft für Informatik (GI), Magdeburg 1999, Metropolis-Verlag, Marburg*, pp. 403-416
- DEHN, M., GÄRTNER, H. & R. DIKAU (2001): Principles of semantic modeling of landform structures. In: *Computers and Geosciences, Vol 27/8*, p. 1005 - 1010.
- SCHMIDT, J., GÄRTNER, H. & R. DIKAU (2000): Investigations in Slope Development through Landslide Activity - Concepts, Methods, and Implications for Interdisciplinary and Interoperable Data Management. *Schriftenreihe des SFB 350, Vol. 84, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Presented at: 4th International Conference on Geocomputation, Mary Washington College, Fredericksburg, Virginia, July 25-28, 1999.*
- SCHMIDT, J. & H. GÄRTNER (2000): Investigations of geomorphometric significance in hydrologic processes using geo-information technologies - results and implications for GIS needs in geomorphology. *Schriftenreihe des SFB 350, Vol. 83, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.*

## **PUBLIKATIONEN**

---

DIKAU, R., GÄRTNER, H., HOLL, B., KIENHOLZ, H., MANI, P. & M. ZIMMERMANN  
(1996): Untersuchungen zur Murgangaktivität im Mattertal, Wallis, Schweiz. In:  
INTERPRAEVENT 1996, Tagungspublikation Bd.1, p.397-408.