

# Rekonstruktion geomorphologischer Prozessabläufe unter Verwendung dendrogeomorphologischer Methoden und der holzanatomischen Analyse von Jahrringen in Buchenwurzeln

## Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt der

Naturwissenschaftlichen Fakultät III  
der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg  
Institut für Geowissenschaften  
Physische Geographie



von Ingo Sahling

Gutachter:

1. Prof. Dr. Karl-Heinz Schmidt  
(Institut für Geowissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Deutschland)
2. Prof. Dr. Fritz H. Schweingruber  
(Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft;  
WSL, Birmensdorf, Schweiz)

Die Verteidigung der Dissertation erfolgte am 22. Februar 2007.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Geowissenschaften der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg unter der Leitung von Prof. Dr. Karl-Heinz Schmidt und Dr. Holger Gärtner (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft; WSL, Birmensdorf, Schweiz) durchgeführt.

Mein Dank gebührt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Graduiertenförderung des Landes Sachsen-Anhalt für die finanzielle Unterstützung des Projektes.

Für die Betreuung der Arbeit, die zahlreichen Anregungen und vielfach mit ihm geführten Diskussionen, möchte ich Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Schmidt meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Ferner danke ich ihm für die Freiheit, die er mir bei der Wahl und während der Bearbeitung des Themas ließ.

Mein besonderer Dank gilt weiterhin Dr. Holger Gärtner für seine engagierten, fachlichen Ratschläge. Seiner Unterstützung und Förderung, auch über große Entfernungen hinweg, habe ich zu verdanken, dass die Begeisterung für die Dendrogeomorphologie in mir wuchs.

Prof. Dr. Fritz H. Schweingruber danke ich für seine wertvollen Hinweise und Ratschläge. Mit seiner fachlichen Kompetenz, insbesondere die Holzanatomie betreffend, war er mir stets ein geschätzter und unentbehrlicher Ansprechpartner.

Der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL bin ich für die Kooperation und die unkomplizierte Nutzung des Labors zur Herstellung der zahlreichen Dünnschnitte zu großem Dank verpflichtet. Ebenso danke ich Werner Schoch für seine technische Mithilfe bei der Anfertigung von Makroaufnahmen. Sehr herzlich verbunden bin ich mit Daniel Nievergelt, Britta Eilmann, Matthias Schaub, Dr. Pascale Weber und Dr. Andreas Rigling für ihre Unterstützung, Hilfsbereitschaft und die stets angenehme Arbeitsatmosphäre.

Für seine tatkräftige Mitarbeit im Rahmen der Geländearbeiten danke ich Mario Roßberg. Außerdem möchte ich mich für die Unterstützung beim Anlegen der Testfelder, die vielen fruchtbaren Gespräche und Diskussionen sowie die Zusammenarbeit in den letzten Jahren bei Wolfram König, David Morche, Ekkehard Ließ, Burkhard Sonnabend, Ilka Fabig, Andrea Srugies bedanken.

Dr. Dieter Steinbrecher danke ich sehr herzlich für seine Hinweise und kritischen Betrachtungen, insbesondere bei der Durchsicht des Manuskripts.

Für die zügige und unkomplizierte Erteilung von Fahrgenehmigungen für die entsprechenden Untersuchungsgebiete bin ich den Forstämtern Arnstadt, Bleicherode, Creuzburg, Ershausen, Leinefelde, Mühhausen und Paulinzella zu Dank verpflichtet.

Herzlicher Dank gilt meinen Eltern und Elisabeth Steinbrecher, die mir mit ihrer Geduld und als moralischer Beistand immer eine außerordentlich große Stütze waren.

Abschließend möchte ich mich bei all jenen bedanken, die hier nicht namentlich genannt wurden, die mich jedoch in den letzten Jahren bei vielen Gelegenheiten unterstützt haben und auf deren Verständnis und ehrlichen Rat ich mich stets verlassen konnte.

Ingo Sahling, Halle (Saale), 2006

---

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>X</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Fragestellungen der Untersuchung	3
1.2 Stand der Forschung	5
<b>2. Grundlegende Betrachtungen zum Wurzelwachstum</b>	<b>8</b>
2.1 Entwicklung der Primär- und Sekundärstruktur von Wurzel und Sprossachse	8
2.1.1 Wurzel	8
2.1.2 Sprossachse	9
2.2 Anatomische Grundlagen der Dicotyledonen (Laubhölzer)	10
2.3 Beeinflussende Faktoren auf das Wachstum von Stamm- und Wurzelholz	15
2.4 Funktionen von Wurzeln, Ausbreitung der Wurzeln im Untergrund	19
<b>3. Charakteristik der Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe</b>	<b>22</b>
<b>4. Untersuchungsgebiete</b>	<b>27</b>
4.1 Lage der Untersuchungsgebiete	28
4.2 Geologische und morphologische Aspekte der Wellenkalk-Schichtstufe	28
4.3 Klima, Böden und Vegetation	33
4.4 Allgemeine Daten zu <i>Fagus sylvatica</i> L.	36
<b>5. Methoden</b>	<b>38</b>
5.1 Standortauswahl und Anlegen eines Testfeldes	38
5.2 Geomorphologische Kartierung	40
5.3 Datenmaterial und Probennahme	41
5.4 Codierung und Präparation der Proben	43
5.5 Materialauswertung	45

---

5.5.1	Jahrringbreitenmessung	46
5.5.2	Statistische Methoden	48
5.5.3	Wurzelreaktionen	50
5.5.4	Zellgrößenmessung	50
<b>6.</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>53</b>
6.1	Strukturen in künstlich freigelegten und nicht freigelegten Wurzeln	53
6.1.1	Holzanatomische Strukturen in Koniferenwurzeln ( <i>Pinus sylvestris</i> )	53
6.1.2	Holzanatomische Strukturen nicht freigelegter Wurzeln von <i>Fagus sylvatica</i> L.	55
6.1.3	Holzanatomische Strukturen in Wurzeln nach künstlicher Freilegung bei <i>Fagus sylvatica</i> L.	59
6.1.4	Diagnostische Merkmale	66
6.2	Geomorphologische Kartierung der Untersuchungsgebiete	68
6.3	Strukturen natürlich freigelegter Wurzeln	71
6.3.1	Schnelle Freilegung	71
6.3.2	Schnelle und kontinuierliche Freilegung	81
6.3.3	Phasenweise Freilegung	90
6.4	Zeitliche Rekonstruktion von Spaltenöffnungen	102
6.4.1	Junkerholz / Westerwald (Eichsfeld)	102
6.4.2	Appental / Trefffurter Stadtwald (Ringau)	107
6.4.3	Ritterholz (Dün)	111
6.4.4	Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge)	113
6.5	Zusammenfassung	116
<b>7.</b>	<b>Diskussion</b>	<b>119</b>
<b>8.</b>	<b>Ausblick</b>	<b>123</b>
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>124</b>
<b>10.</b>	<b>Kartenverzeichnis</b>	<b>133</b>
	<b>Anlagen</b>	

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 2.1:	Vergleich der Primär- und Sekundärstruktur von Wurzel- und Sprossachse am Beispiel einer dikotylen Holzpflanze.	9
Abb. 2.2:	Dreidimensionale Darstellung der Zellelemente im Xylem und Phloem eines Laubholzes.	10
Abb. 2.3:	Ausschnitt (Querschnitt) aus dem Holz einer Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> L.).	12
Abb. 2.4:	Formen der Parenchymverteilung (A - F; schematisch): A - diffus; B - diffus gehäuft; C - marginal; D - spärlich; E - vasizentrisch; F - aliform (Grosser 1977: 40; verändert).	12
Abb. 2.5:	Beispiele für Laubholztypen: A - Esche (ringporig); B - Ahorn (zerstreutporig) und C - Buche (halbringporig). In der Gegenüberstellung werden die unterschiedlichen Verteilungsmuster der Gefäße innerhalb des Jahrrings deutlich.	13
Abb. 2.6:	Querschnitt durch die Rinde eines Robinienstammes ( <i>Robinia pseudoacacia</i> ).	14
Abb. 2.7:	Thyllen, blasenartige Auswüchse von Parenchymzellen, die ganz oder teilweise das Gefäßlumen verstopfen. Querschnitt (A) und Längsschnitt (B) durch das Holz einer Weiß-Eiche ( <i>Quercus alba</i> ).	16
Abb. 2.8:	Zugholzfasern bei Robinie ( <i>Robinia pseudoacacia</i> ) mit rein cellulosehaltigen sogenannten Gelatinösen Schichten (Pfeile), 2000fach.	17
Abb. 2.9:	Schematische Darstellung der frühen Entwicklungsstadien einer Wurzelspitze.	20
Abb. 3.1:	Bewegungsarten einer Scholle an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken.	24
Abb. 3.2:	Hauptformenschatz der Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken.	25
Abb. 4.1:	Die Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken.	27
Abb. 4.2:	Geologische Übersicht des Thüringer Beckens ohne quartäre Bildungen.	29
Abb. 4.3:	Reliefelemente einer Schichtstufenlandschaft.	31
Abb. 4.4:	Der stratigraphische Aufbau der Muschelkalk-Schichtstufe.	32
Abb. 4.5:	Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im Thüringer Becken. Zeitraum 1961 bis 1990.	34
Abb. 4.6:	Verbreitungskarte Rotbuche (SDW-Schutzgemeinschaft Deutscher Wald 2006).	36
Abb. 5.1:	Foto einer vermessenen Wurzelprobe mit markierten Positionen der zu entnehmenden Wurzelscheiben.	42
Abb. 5.2:	Zuwachsbohrer zur Probennahme am Stamm einer <i>Fagus sylvatica</i> L.	42
Abb. 5.3:	Codierung der Bohrkern- und Wurzelproben.	43
Abb. 5.4:	Abtrennung des markierten Bereichs aus einer Wurzelscheibe zur Anfertigung eines Dünnschnitts.	44
Abb. 5.5:	Schlittenmikrotom mit fixiertem Präparat und eingespanntem Messer, im optimalen Schnittwinkel von 11°.	45
Abb. 5.6:	Analyseanlage mit digitaler Aufnahmeeinheit.	51
Abb. 5.7:	Abbildung einer Arbeitsroutine aus dem Programm Image-Pro-Plus.	51
Abb. 5.8:	Beispielhafte Darstellung eines Boxplot mit Erläuterungen.	52

Abb. 6.1:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel 1DB0802h (A), der Übergangzone Substrat/Freilegung 2DB0802h (B) und dem bedeckten Teil der Wurzel zum Zeitpunkt der Freilegung 3DB0802h (C), mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Wurzel 3DB0802h (MW bedeckt) und für den freigelegten Zeitraum (2004-2005, in den Dünnschnitten markiert) von 1DB0802h (MW frei 1DB0802h).	54
Abb. 6.2:	Vergleich der holzanatomischen Struktur von Stamm (A) und Wurzel (B), einer Buche ( <i>Fagus sylvatica</i> L.).	56
Abb. 6.3:	Vergleich von Wurzelquerschnitten ( <i>Fagus sylvatica</i> L.) aus unterschiedlichen Tiefen: A - 16 cm Tiefe, B - 10 cm Tiefe, C - 4 cm Tiefe.	57
Abb. 6.4:	Jahrring mit Fasertracheiden und Librifasern als Ausdruck von Stabilitätstendenzen.	58
Abb. 6.5:	Künstlich freigelegte Wurzelprobe SDB0601e (Pfeile) des Baumes SDB0601. A - Situation der Wurzel SDB0601e während 16-monatiger Freilegung; B - Situation am Tag der Wurzelentnahme.	59
Abb. 6.6:	Wurzelstrang SDB0601e, markiert sind die entnommenen Querschnitte (oben). Die entsprechenden Dünnschnitte aus den einzelnen Sektionen der Wurzel: nicht freigelegt - (5DB0601e), Übergangzone - (3DB0601e), freigelegt - (1DB0601e, 2DB0601e).	60
Abb. 6.7:	Ausschnitte aus den einzelnen Dünnschnitten der drei Sektionen von Wurzel SDB0601e. A - nicht freigelegt (5DB0601e); B - Übergangzone (3DB0601e); C - freigelegt (2DB0601e). Die blauen Pfeile markieren jeweils die Frühholzgefäßreihe des Jahres 200	61
Abb. 6.8:	(A-D): Vergleich der Gefäßflächenmessungen zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel - 1DB0601e (A), 2DB0601e (B) der Übergangzone Substrat/Freilegung - 3DB0601e (C) und dem zum Zeitpunkt der Freilegung bedeckten Teil der Wurzel - 5DB0601e (D).	62
Abb. 6.9:	Zusammenfassende Darstellung des Wurzelstrangs SDB0601e. Alle vier gemessenen Querschnitte sind dargestellt.	63
Abb. 6.10:	Auskeilender Jahrring in einer <i>Fagus sylvatica</i> L. Wurzel.	63
Abb. 6.11:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen ( <i>Fagus sylvatica</i> L.) zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel - 0DB0615e (A), 1DB0615e (B), der Übergangzone Substrat/Freilegung - 2DB0615e (C) und dem bedeckten Teil der Wurzel zum Zeitpunkt der Freilegung - 3DB0615e (D).	64
Abb. 6.12:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen ( <i>Fagus sylvatica</i> L.) zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel - 1DB0618e (A), 2DB0618e (B), der Übergangzone Substrat/Freilegung - 3DB0618e (C) und dem bedeckten Teil der Wurzel zum Zeitpunkt der Freilegung - 4DB0618e (D).	65
Abb. 6.13:	Standort SDB0501 mit Wurzelstrang SDB0501e. A: Blick von der kleinen Scholle auf die Abrißwand; B: Blick in die Spalte.	71
Abb. 6.14:	Schematische Darstellung des Wurzelstrangs SDB0501e mit den heraus getrennten Scheiben, Scannbilder der einzelnen Querschnitte, aus dem freigelegten Teil (2DB0501e) und der Grenze Substrat/Freilegung (1DB0501e, 0DB0501e).	72
Abb. 6.15:	Gegenüberstellung der Wurzelscheiben 0DB0501e und 2DB0501e ( <i>Fagus sylvatica</i> L.). Die Vergrößerungen der Dünnschnitte entsprechen den Ausschnitten der jeweiligen Wurzelscheibe.	74
Abb. 6.16:	Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 2DB0501e mit einem deutlichen Niveauwechsel ab 1954, mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 2DB0501e (MW frei).	76
Abb. 6.17:	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Gefäßflächenmessung der Wurzelprobe 2DB0501e von bedeckten (1883-1953) und freigelegten (1954-2002) Zeitabschnitten.	76

Abb. 6.18:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen ( <i>Fagus sylvatica</i> L.) zwischen dem freigelegten Querschnitt 2DB0501e (ab 1954) und dem Querschnitt aus der Übergangszone Substrat/Freilegung 0DB0501e.	77
Abb. 6.19:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Querschnitte 2DB0501e und 0DB0501e im selben Zeitraum 1914 bis 1953. Signifikant kleiner sind die Gefäßflächen des Querschnitts 0DB0501e.	77
Abb. 6.20:	Vergleich der Radien SDB0501a und SDB0501b des Probenbaums SDB0501. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.	78
Abb. 6.21:	Vergleich der Radien SDB0501a, SDB0501b, SDB0501e und SDB0501d des Probenbaums SDB0501. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.	78
Abb. 6.22:	Standort SDD0503 mit Wurzelstrang SDD0503e.	81
Abb. 6.23:	Darstellung des Wurzelstrangs SDD0503e mit entsprechenden Querschnitten der einzelnen Abschnitte. Alle vier Proben (0DD0503e, 1DD0503e, 2DD0503e, 3DD0503e) waren zum Zeitpunkt der Entnahme bereits freigelegt.	82
Abb. 6.24:	Dünnschnitt des schnell freigelegten Querschnittes 1DD0503e mit markierten Sektionen A, B und C.	83
Abb. 6.25:	Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 1DD0503e.	84
Abb. 6.26:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 1DD0503e von bedeckten (1861-1926) und freigelegten (1927-2004) Zeitabschnitten.	84
Abb. 6.27:	Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 0DD0503e mit einer kontinuierlich ablaufenden Reduktion mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 0DD0503e (MW frei).	85
Abb. 6.28:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 0DD0503e, des kontinuierlichen Übergangs von bedeckten (1854-1925) zum endgültig freigelegten (1958-2004) Zeitraum.	85
Abb. 6.29:	Dünnschnitt des kontinuierlich freigelegten Querschnittes 0DD0503e mit markierten Sektionen A, B, C und D. Ausschnitte aus den jeweiligen Sektionen.	86
Abb. 6.30:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 0DD0503e und 1DD0503e.	87
Abb. 6.31:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 0DD0503e, 1DD0503e und 3DD0503e.	87
Abb. 6.32:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben 0DD0503e, 1DD0503e und 3DD0503e im selben Zeitraum von 1929 bis 1958.	88
Abb. 6.33:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben 0DD0503e, 1DD0503e und 3DD0503e im selben Zeitraum 1973 bis 1982.	88
Abb. 6.34:	Standort SDD0101 mit Wurzelstrang SDD0101e+f (Pfeil).	90
Abb. 6.35:	Foto der Wurzelprobe SDD0101e+f.	91
Abb. 6.36:	Gefäßfläche von Dünnschnitt 2DD0101e mit Trendlinien für Phasen der Freilegung dieses Wurzelabschnittes.	92
Abb. 6.37:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 2DD0101e, für vier ermittelte Phasen im Zuge der Freilegung ab 1919.	93
Abb. 6.38:	Wurzelstrang SDD0101e+f. Deutlich ist die Moosbedeckung im linken Teil der Wurzel SDD0101e+f zu erkennen.	93
Abb. 6.39:	Gegenübergestellt sind die zwei Dünnschnitte 2DD0101e und 5DD0101e.	94
Abb. 6.40:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 5DD0101e und 2DD0101e mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Kurve 5DD0101e (MW bedeckt), für die gesamte Kurve 5DD0101e (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 5DD0101e (MW frei).	95

Abb. 6.41:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 5DD0101e, ermittelte Phasen der Freilegung in den Jahren 1919 bis 1932 und 1984 bis 2004.	95
Abb. 6.42:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 1DD0101e und 2DD0101e, mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Kurve 1DD0101e (MW bedeckt), für die gesamte Kurve 1DD0101e (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 1DD0101e (MW frei).	96
Abb. 6.43:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 1DD0101e von bedeckten (1850-1949) und freigelegten (1950-2004) Zeitabschnitten.	96
Abb. 6.44:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 4DD0101f (nicht freigelegt), 2DD0101e und 5DD0101e (zum Zeitpunkt der Wurzelentnahme freigelegt). Mittelwert aller drei Kurven (MW gesamt).	97
Abb. 6.45:	Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 4DD0101f (nicht freigelegt) und 1DD0101e (zum Zeitpunkt der Wurzelentnahme freigelegt) mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Kurve 1DD0101e (MW bedeckt), für die gesamte Kurve 1DD0101e (MW gesamt), für den freigelegten Zeitraum von 1DD0101e (MW frei) und dem Mittelwert der gesamten Kurve von 4DD0101f.	97
Abb. 6.46:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben 1DD0101e, 2DD0101e und 4DD0101f im selben Zeitraum 1950 bis 2004.	98
Abb. 6.47:	Vergleich der Radien SDD0101a und SDD0101b des Probenbaums SDD0101 mit der Referenzkurve des Standortes (SDM07m). Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.	99
Abb. 6.48:	Vergleich der Radien SDD0101c und SDD0101d des Probenbaums SDD0101 mit der Referenzkurve des Standortes (SDM07m). Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten, aber auch Gegenläufigkeiten (vgl. 1968 bis 1971).	100
Abb. 6.49:	Standort SDE0102, Junkerholz/Westerwald (Eichsfeld) mit Wurzelstrang SDE0102e (Pfeil) und Probenbaum SDE0102.	102
Abb. 6.50:	Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 0DE0102e mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 0DE0102e (MW frei).	103
Abb. 6.51:	Boxplot: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 0DE0102e, nach der Freilegung im Jahre 1904 und einer zeitweiligen erneuten Bedeckung von 1910 bis 1920.	104
Abb. 6.52:	Vergleich der Radien SDE0102a, SDE0102b, SDE0102c und SDE0102d des Probenbaums SDE0102. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.	105
Abb. 6.53:	Standort SDT0101, Appental/Treffurter Stadtwald (Ringau) die Pfeile markieren den Wurzelstrang SDT0101e.	107
Abb. 6.54:	Gefäßflächenmessungen der Wurzel SDT0101e. Dargestellt sind die Querschnitte 0DT0101e, 1DT0101e und 2DT0101e.	108
Abb. 6.55:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben 0DT0101e und 2DT0101e im Zeitraum 1926 bis 2005 bzw. 1931 bis 2005. Die unterschiedlichen Niveaus stellen jeweils den bedeckten (1926-92; 1931-92) und freigelegten (1993-2005) Zeitabschnitt dar.	109
Abb. 6.56:	Vergleich der Radien SDT0101a, SDT0101b, SDT0101c und SDT0101d des Probenbaums SDT0101. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.	109
Abb. 6.57:	Standort SDD0104, Ritterholz (Dün), die Balken markieren den entnommenen Wurzelstrang SDD0104f (Pfeil).	111
Abb. 6.58:	Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 1DD0104f mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 1DD0104f (MW frei).	111

---

Abb. 6.59:	Deutlich wird die Gefäßgrößenreduktion im Dünnschnitt rechts außen. Die Ausschnitte zeigen den auskeilenden Jahrring 1973 (A) und das Freilegungsjahr 1978 (B).	112
Abb. 6.60:	Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Gefäßflächenmessung der Wurzelprobe 1DD0104f von bedeckten (1900-1977) und freigelegten (1978-2004) Zeitabschnitten.	112
Abb. 6.61:	Standort SDB0101, Krajaer Kopf (Bleicheroder Berge) die Balken markieren den entnommenen Wurzelstrang SDB0101f (Pfeil).	113
Abb. 6.62:	Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 1DB0101f mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 1DB0101f (MW frei).	114
Abb. 6.63:	Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 1DB0101f, für ermittelte Phasen der Freilegung in den Jahren 1941 bis 1961 und 1998 bis 2004. Deutlich wird die zwischenzeitliche Wiederbedeckung in den Jahren 1962 bis 1972.	115

**Tabellenverzeichnis**

Tab. 2.1:	Anordnung, Form und Funktion der Laubholzzellen.	11
Tab. 2.2:	Endogene und Exogene Faktoren	15
Tab. 3.1:	Klassifikation von Massenverlagerungen nach (DIKAU et al. 1996: 3), basierend auf EPOCH (1993).	23
Tab. 4.1:	Stratigraphie des Oberen Buntsandsteins (Röt) und des Unteren Muschelkalk (Wellenkalk). Mächtigkeit A - Oberes Eichsfeld / Hainich; Mächtigkeit B – Hainleite / Dün; Mächtigkeit C - Thüring. Senke.	30
Tab. 4.2:	Zusammenstellung physiologischer Angaben zu <i>Fagus sylvatica</i> L..	37
Tab. 5.1:	Übersicht Datenmaterial, Anzahl der jeweiligen Datengrundlage.	41
Tab. 5.2:	Verzeichnis der Stationen mit den entsprechenden Zeiträumen die durch die Niederschlagsmessstellen abgedeckt werden. Weiterhin wird angegeben ob es sich um Monats- oder Tageswerte von extremen Niederschlagsereignissen des jeweiligen Zeitraums handelt.	47
Tab. 5.3:	Cross-Dating Parameters, zur Analyse von Jahrringbreitenkurven (User Reference, Jahrringmessprogramm TSAP-Win Professional).	49
Tab. 5.4:	Erläuterung der gemessenen Parameter aus dem Programm Image-Pro-Plus.	52
Tab. 6.1:	Absolute Höhenlage der Trauf in den untersuchten Massenverlagerungsgebieten.	68
Tab. 6.2:	Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDB0501.	79
Tab. 6.3:	Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität des Untergrundes (Kluftbildung, Spaltenöffnung) am Standort SDB0501 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen.	80
Tab. 6.4:	Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDD0503 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen.	89
Tab. 6.5:	Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDD0101.	100
Tab. 6.6:	Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDD0101 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen.	101
Tab. 6.7:	Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDE0102.	105
Tab. 6.8:	Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDE0102 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen.	106
Tab. 6.9:	Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDT0101.	110
Tab. 6.10:	Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDT0101 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen.	110
Tab. 6.11:	Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDD0104 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen.	113
Tab. 6.12:	Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDB0101 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen.	115

## 1. Einleitung

Die Dendrochronologie hat sich vor allem in den letzten beiden Jahrzehnten weltweit als anerkannte Wissenschaft etabliert (COOK & KAIRIUKSTIS 1990, BRÄUNING 1995, SCHWEINGRUBER 1996, GÄRTNER et al. 2004). Das weit gefasste Anwendungsspektrum der Dendrochronologie eröffnet vor allem in den Geowissenschaften vielfältige Möglichkeiten für umfassende Analysen von Veränderungen der Umwelt (GÄRTNER 2006a).

Eine zunehmend wichtige Rolle im Zusammenhang mit der Erfassung und Quantifizierung vergangener und rezenter Prozesse, spielt eine Teildisziplin der Dendrochronologie, die Dendrogeomorphologie (ALESTALO 1971). Die jahrgenaue Datierung von Ereignissen die sich im Jahrringbild von Bäumen manifestieren, eröffnet bezüglich der Rekonstruktion und Datierung gravitativer Prozesse zahlreiche Möglichkeiten (SHRODER 1980, FANTUCCI & McCORD 1995, WILES et al. 1996, SOLOMINA 2002). Jedoch konzentrierten sich bisher die meisten Arbeiten ausschließlich auf die Analyse von Wachstumsreaktionen des Stammholzes und der Interpretation von Jahrringbreiten (SCHWEINGRUBER 2001).

Obwohl sich gerade in den letzten Jahren zahlreiche Studien mit den Möglichkeiten der Analyse auf zellulärer Ebene auseinandersetzen, erfolgten diese Untersuchungen meist vor dem Hintergrund der möglichen höheren zeitlichen Auflösung von Klima-Wachstums-Beziehungen in Jahrringen des Stammes (u.a. GARCIA & ECKSTEIN 2003, GARCIA & FONTI 2006, PARK 2000, SASS & ECKSTEIN 1995).

Dagegen wurden Wurzelholzanalysen hauptsächlich im Rahmen von Altersbestimmungen von Adventivwurzeln (STRUNK 1995), Rekonstruktionen von Erosionsraten (LA MARCHE 1961, 1963) und der Bestimmung der Variabilität der Wurzelholzanatomie (FAYLE 1968) nach einer Freilegung durchgeführt.

Umfassende Untersuchungen, die das Potential der holzanatomischen Analyse von Wurzeln zur Prozessrekonstruktion erstmals aufzeigten, erfolgten durch GÄRTNER et al. (2001). Jedoch beschränkt sich GÄRTNER (2003) aufgrund der heterogenen Strukturen im Zellaufbau von Laubhölzern, nur auf Nadelhölzer.

Die Ausweitung der Analyse von holzanatomischen Veränderungen auf Laubhölzer, speziell Buchenwurzeln, soll die Einschränkung auf Nadelhölzer aufheben. Notwendig ist diese Ausweitung auch vor dem Hintergrund, dass zahlreiche Naturräume ausschließlich Laubholzbestände aufweisen.

Der durch *Fagus sylvatica* L. (Buche) geprägte Baumbestand an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken, vor allem in den westlichen Teilen, macht diesen Raum zu einem idealen Testfeld für eine solche Untersuchung. Die natürliche Morphodynamik der Schichtstufenlandschaft in Form

von rezenten Massenverlagerungen, ermöglicht die Anwendung der holzanatomischen Analyse in Verbindung mit dendrogeomorphologischen Methoden. Die sich daraus ergebende Möglichkeit der Datierung von Massenverlagerungen soll helfen, die Kinematik der Prozessabläufe zu verstehen. Gerade die Häufigkeit ihres Auftretens, veranschaulicht durch eine Vielzahl an Veröffentlichungen und wissenschaftlichen Untersuchungen (u.a. BAUM & SCHMIDT 2001; JOHNSEN 1974, JOHNSON 1984a; JOHNSEN & SCHMIDT 2000; SCHMIDT 1988b, SCHMIDT & BEYER 2002), macht die Notwendigkeit deutlich, die initialen Prozessabläufe zu verstehen. Dabei ist das Auftreten von initialen Spaltenbildungen ein erstes mögliches Anzeichen für rezente Bewegungen des Untergrundes.

Erste dendrochronologische Ansätze zur Erfassung der Kinematik an der Wellenkalk-Schichtstufe erfolgten durch BAUM & SCHMIDT (2001). Sie verglichen anhand von Jahrringbreitenanalysen ermittelte Bewegungsgeschwindigkeiten von Randblöcken, mit Langzeitmessungen von JOHNSEN (1981) und JOHNSEN & SCHMIDT (2000). Allerdings konzentrierten sich auch diese Arbeiten auf die Analyse von Wachstumsreaktionen des Stammholzes.

Die anatomisch heterogen aufgebaute Struktur der Laubhölzer (*Fagus sylvatica* L.), speziell die des Wurzelholzes, sind im Vergleich zu Nadelbäumen bisher nicht untersucht worden. Diese Arbeit soll das Potential einer neuen Methode darlegen und anhand der ermittelten Reaktionen von Buchenwurzeln (*Fagus sylvatica* L.) auf eine Freilegung Möglichkeiten der Rekonstruktion gravitativer Prozesse an der Wellenkalk-Schichtstufe aufzeigen.

## 1.1 Fragestellungen der Untersuchungen

Wichtigster Aspekt dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung der holzanatomischen Analyse der Wurzeln von Laubhölzern. Eine gezielte Anwendung in rezent aktiven Massenverlagerungsgebieten an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken soll die Einsatzmöglichkeiten dieser Methode prüfen.

Die entscheidende Vorbereitungsphase der gravitativen Massenverlagerungen, die initialen Spaltenöffnungen, traten bei den bisherigen Untersuchungen in den Hintergrund. In diesem Zusammenhang ist die Notwendigkeit des Einsatzes neuer Methoden zur Beurteilung vergangener und vor allem rezenter Prozesse zwingend erforderlich.

Die Bewertung der holzanatomischen Wurzelanalyse kann nur dann in ausreichendem Maße gelingen, wenn sowohl das normale Wachstum einer Wurzel in unterschiedlichen Tiefen bekannt ist, als auch die Reaktion auf sich verändernde Umweltbedingungen im direkten Umfeld der Wurzel.

Folgende Hypothesen wurden aufgestellt, die durch die vorliegende Arbeit verifiziert werden sollen:

- Es ist möglich, sichtbare Veränderungen in der Wurzelholzstruktur durch eine künstliche Freilegung entsprechender Wurzelteile herbeizuführen.
- Die Holzstruktur eines freigelegten und eines nicht freigelegten Wurzelabschnittes unterscheiden sich sichtbar/messbar voneinander.
- Anhand der holzanatomischen Veränderungen in den Wurzeln, lassen sich kontinuierliche Prozesse von abrupten Ereignissen unterscheiden.
- Erst die detaillierte Aufnahme der Situation der Wurzel und des Umfeldes lassen eine genaue Einordnung des abgelaufenen geomorphologischen Prozesses zu.

Die Verifizierung einer Freilegungsreaktion bei Laubholzswurzeln, speziell bei *Fagus sylvatica* L., erfordert das Anlegen eines Testfeldes. Dabei werden sowohl Wurzeln von Nadelhölzern (*Pinus sylvestris*) und Laubhölzern (*Fagus sylvatica* L.; *Fraxinus excelsior*) künstlich freigelegt. Die bekannte Freilegungsreaktion von Nadelhölzern, die andauernde Reduktion der Größe der Frühholzzellen im Querschnitt um 50% im Verhältnis zu vorausgehenden Jahren desselben Querschnitts (GÄRTNER 2003), soll hierbei als Abgleich dienen, um die Reaktion der Laubhölzer einordnen zu können. Da der anatomische Aufbau der Laubhölzer sehr heterogen ist und sich

einzelne Arten deutlich unterscheiden, ist davon auszugehen, dass sich die Untersuchung letztlich nur auf bestimmte Baumarten konzentrieren kann. Hinzu kommt, dass große Bereiche der westlichen Schichtstufenlandschaft im Thüringer Becken einen Buchenbestand aufweisen und somit eine Konzentration auf *Fagus sylvatica* L. nicht ausbleiben konnte. Letztendlich sollen anhand der ermittelten Reaktionen auf eine Freilegung, im Zusammenspiel mit geomorphologischen Geländeansprachen, initiale Spaltenbildungen an der Wellenkalk-Schichtstufe zeitlich eingeordnet werden.

Die daraus resultierenden Fragestellungen können wie folgt formuliert werden:

- Gibt es charakteristische anatomische Veränderungen bei Laubböhlzern (speziell *Fagus sylvatica* L.) nach einer Freilegung (künstlich und natürlich)? Welche sind das? Wie sieht die Wurzelstruktur bei nicht freigelegten Wurzeln von *Fagus sylvatica* L. aus?
- Ermöglichen die ermittelten anatomischen Veränderungen in der Wurzelstruktur eine Datierung des Freilegungszeitpunktes?
- Ist die gezielte Anwendung der Wurzelstrukturveränderungen zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse (Massenverlagerungen, Spaltenöffnungen) an der Wellenkalk-Schichtstufe möglich? Kann anhand der Ausprägung der holzanatomischen Veränderungen auf die Art der Freilegung geschlossen werden?
- Können im Zuge der Datierung von Spaltenöffnungen, Bewegungsraten und -phasen rekonstruiert werden?

Die Möglichkeit der Bestimmung von auftretenden diagnostischen Merkmalen infolge einer Freilegung der Wurzeln von *Fagus sylvatica* L., die mit dieser Arbeit aufgezeigt werden sollen, wird das Methodenspektrum zur Datierung geomorphologischer Prozesse deutlich erweitern.

## 1.2 Stand der Forschung

Schon im 15. Jahrhundert berichtete Leonardo da Vinci von der Beziehung zwischen Niederschlägen und Jahrringbreiten, am Beispiel von Kiefern in der Toskana (CORONA 1986). Bereits 1758 suchte H. L. Duhamel du Monceau nach dem Bildungsort für Holz und Rinde. Allerdings erkannte erst Ch. F. Mirbel im Jahre 1828 die Bedeutung des Kambiums. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts begannen J. J. P. Moldenhawer, Ch. F. Mirbel und H. von Mohl, mit der Beschreibung der Anatomie und Physiologie von Bäumen und Sträuchern (FREUND 1951). In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts erfolgten erste Betrachtungen zur Anatomie und Ökologie durch die Forstbotaniker Theodor Hartig (1805-1880) und Robert Hartig (1839-1901). Bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts entstanden zahlreiche Arbeiten, die sich mit der Anatomie des gesamten Baumes beschäftigten (u.a. VON MOHL 1862, 1869; SCHACHT 1860, 1862; HARTIG, R. 1869, 1871, 1882, 1895, 1896A, 1896B; HARTIG, R. & WEBER 1888; HARTIG, TH. 1878; SANIO 1873; STRASBURGER 1891). Weitere Autoren folgten, und zeigten Unterschiede in der Kambialaktivität als Reaktion auf veränderte Umweltbedingungen auf. Dabei lag der Schwerpunkt der Untersuchungen sowohl bei den Wurzeln als auch beim Stamm und der Krone (VON MOHL 1862, 1869; JACCARD 1912, 1917; HARTIG, R. 1871, 1893A, 1894A, 1898; HARTIG, TH. 1863, NÖRDLINGER 1872; KNY 1877, 1908; SCHWARZ 1892; WIELER 1891).

Mit der Einführung des Crossdating-Verfahrens durch den Amerikaner Andrew Ellicott Douglass (1867-1962) Anfang des letzten Jahrhunderts, wurde der ökologische Grundgedanke durch den archäologischen und paläoklimatischen Aspekt in den Hintergrund gedrängt (SCHWEINGRUBER 1983). Dabei entfernten sich die Forscher von der Betrachtung des gesamten Baumes und konzentrierten sich mit der Dendrochronologie – der Altersbestimmung von Holz (DOUGLASS 1921, 1937) und Dendroklimatologie – Klima-Wachstums-Beziehungen (FRITTS 1976) auf die Jahrringbreiten im unteren Stammbereich.

Bruno Huber (1899-1969) folgte der Tradition der dendroökologischen Forschung von Theodor und Robert Hartig (HUBER 1941, 1951, 1961). Die Ideen der Forstbotaniker Hartig wurden stark erweitert und die Verwendung der Methode von Douglass galt weiterhin als Grundlage, aber nicht mehr als alleiniges Kriterium für die Methoden der dendrochronologischen Forschung (SCHWEINGRUBER 1983).

Der Begriff der Dendroökologie (BRÄUNING 1995) steht heute für eine umfassende Wissenschaft und beinhaltet Teildisziplinen unterschiedlicher Ausrichtung, u.a. Dendrohydrologie (BAYARD & SCHWEINGRUBER 1991), Dendroklimatologie (ESPER et al. 2001), Dendroglazialogie (HOLZHAUSER 1987) und zahlreicher anderer Teildisziplinen (GÄRTNER 2006a).

Der Begriff der Dendrogeomorphologie geht auf den finnischen Geographen ALESTALO (1971) zurück. Er gibt einen ersten Ausblick über die vielfältigen Möglichkeiten der Anwendung von Jahrringen im Bezug auf die Interpretation geomorphologischer Sachverhalte (ALESTALO 1971). Generelle Aspekte der Dendrogeomorphologie sind bei GÄRTNER et al. (2004), HEIKKINEN (1994) SCHWEINGRUBER (1996), SHRODER (1980) und STRUNK (1997) festgehalten. Zahlreiche Publikationen

beschäftigen sich mit dendrogeomorphologischen Analysen gravitativer Prozesse (BÉGIN & FILON 1988; BRAAM et al. 1987a, 1987b; GERS et al. 2001; DENNELER & SCHWEINGRUBER 1993; FANTUCCI 1994, 1995; SCHMID & SCHWEINGRUBER 1995, SCHWEINGRUBER 1983, 1996; SHRODER 1978).

Eine quantitative Beziehung zwischen dem Neigungswinkel eines Stammes und der Exzentrizität des radialen Zuwachses, als Ausdruck eines geomorphologischen Prozesses, stellten ALESTALO (1971) und SHRODER (1978) her. DENNELER & SCHWEINGRUBER (1993) untersuchten Wachstumsanomalien wie Reaktionsholz und abrupter Wachstumswechsel im Hinblick auf den Einfluss durch langsame aber anhaltende Bewegungen des Untergrundes. FANTUCCI (1994) nutzte Bäume als „natürlichen Hangneigungsmesser“ und ermittelte Aktivitätsphasen von Massenverlagerungen.

Im Rahmen dieser Arbeiten wurden vor allem Wachstumsreaktionen des Stammholzes untersucht. Analysen des Wurzelholzes beschränkten sich vor allem auf die dendrochronologische Auswertung von Adventivwurzeln zur Bestimmung von Akkumulationsprozessen (MARIN & FILION 1992, STRUNK 1989a, 1989a, 1990, 1991, 1995, 1997). Spezifische Reaktionen von Wurzeln (holzanatomische Veränderungen) auf sich verändernde Umweltbedingungen wurden bisher nur selten wissenschaftlich analysiert (CUTLER et al. 1987, GÄRTNER et al. 2001, GÄRTNER 2003, SCHWEINGRUBER 2001).

Eine umfassende Studie über die Variabilität der Wurzelholzanatomie (als Reaktion auf die Wurzelfreilegung) von Laub- und Nadelbäumen unter wechselnden ökologischen Bedingungen, wurde von FAYLE (1968) durchgeführt. LAMARCHE (1968) maß die Erosionsraten in der Umgebung von Bäumen (*Pinus longaeva*) und setzte sie in Beziehung zu den freigelegten Wurzeln.

Aus der Distanz der Wurzeloberkante und der aktuellen Bodenoberfläche berechnete er durchschnittliche Abtragungsraten. Untersuchungen zu Klima-Wachstumsbeziehungen von Wurzel und Stamm an den Baumarten Eiche (*Quercus robur*, *Quercus petraea*), Buche (*Fagus sylvatica* L.), Kiefer (*Pinus sylvestris*) und Fichte (*Picea abies*) erfolgten durch KRAUSE & ECKSTEIN (1993). Dendrochronologische Analysen zur Altersbestimmung an Wurzelsystemen wurden von KRAUSE & MORRIN (1999) durchgeführt.

Eine der bis heute umfangreichsten Untersuchungen zu holzanatomischen Merkmalen in Wurzeln von Koniferen im Zuge einer Freilegung erfolgte durch GÄRTNER (2003). Hierbei war ein geomorphologischer Ansatz bei der Probennahme und Auswahl entsprechender Wurzeln von entscheidender Bedeutung. Das Kriterium zur Bestimmung des Freilegungszeitpunktes ist nach GÄRTNER (2003) die Reduktion der Größe von Frühholzzellen um durchschnittlich 50%. Darauf aufbauend wurde die durch LAMARCHE (1961, 1968) entwickelte Methode zur Rekonstruktion der durchschnittlichen Erosionsraten deutlich erweitert und bietet nun die Möglichkeit einer detaillierten Erosionsrekonstruktion in jährlicher Auflösung (GÄRTNER 2006b).

Andere aktuelle holzanatomische Arbeiten konzentrieren sich vor allem auf die Morphologie der Wurzel und deren Funktion als Nährstofflieferant der gesamten Pflanze (GEORGE et al. 1997; ENSTONE & PETERSON 2001; HAWES et al. 2000; KRÄMER et al. 1996; PETERSON et al. 1999; TAYLOR & PETERSON 2000; THOMAS & HILKER 2000).

Die Literaturrecherchen zeigen deutlich, dass holzanatomische Untersuchungen zur Beurteilung geomorphologischer Prozesse selten Gegenstand von wissenschaftlichen Arbeiten waren. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag leisten, den methodischen Ansatz von dendrogeomorphologischen Arbeitsweisen in Verbindung mit der holzanatomischen Analyse zu verfeinern. Wichtigster Aspekt werden die Veränderungen in der Struktur der Wurzeln von Dicotyledonen, speziell der Buche (*Fagus sylvatica* L.) sein. Diese Laubholzart war bisher nicht Gegenstand von dendrogeomorphologischen Untersuchungen.

Für das Verständnis des komplexen Wachstumsverhaltens von Wurzeln, speziell *Fagus sylvatica* L., ist es erforderlich, relevante Details näher auszuführen.

## 2. Grundlegende Betrachtungen zum Wurzelwachstum

In diesem Kapitel werden wesentliche Aspekte der Entwicklung von der Primär- zur Sekundärstruktur von Laubholzwurzeln erläutert (**Kapitel 2.1**). Vor allem holzanatomische Veränderungen durch geomorphologische Prozesse sind in dieser Arbeit von besonderer Bedeutung, deshalb wird an dieser Stelle intensiver auf den anatomischen Bau von Laubhölzern, speziell Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.), eingegangen (**Kapitel 2.2**). Die Buche ist die dominierende Baumart in den meisten Untersuchungsgebieten der vorliegenden Arbeit. Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Standorte zu gewährleisten, wurde bei der Untersuchung der Schwerpunkt auf *Fagus sylvatica* L. gelegt.

Weiterhin werden wichtige Faktoren, die das Wachstum von Stamm- und Wurzelholz beeinflussen (**Kapitel 2.3**), beschrieben und die Funktionen von Wurzeln und deren Ausbreitung im Untergrund näher beleuchtet (**Kapitel 2.4**).

### 2.1 Entwicklung der Primär- zur Sekundärstruktur von Wurzel und Sprossachse

Während des ersten Wachstumsjahres erfolgt innerhalb der Wurzel und Sprossachse eines Baumes eine entscheidende Veränderung gegenüber nicht verholzten Pflanzen. Erst dieser Wechsel von einer Primär- zu einer Sekundärstruktur ermöglicht den Gymnospermen (Nacktsamer) und den meisten Angiospermen (Bedecktsamer), zu denen die Laubhölzer zählen, das sekundäre Dickenwachstum und somit die Ausbildung einer Gewebestruktur die als Xylem (Holz) bezeichnet wird.

Die Ausgangslage ist bei der Wurzel und der Sprossachse die gleiche. Beide Pflanzenteile entwickeln sich aus einem Apikalmeristem zu den Primärmeristemen, die sich aus dem Protoderm, dem Grundmeristem und dem Prokambium zusammensetzen (JACOB et al. 1994). Diese bilden die primären Gewebe der Wurzel bzw. der Sprossachse (Abbildung 2.1 W a).

#### 2.1.1 Wurzel

Wurzeln dicotyler Holzpflanzen besitzen einen Zentralzylinder der durch das primäre Xylem gebildet wird und strahlenförmig aufgebaut ist. Diese Xylemstrahlen wechseln sich mit Strängen von primären Phloem ab (Abb. 2.1 W b). Ist das primäre Streckungswachstum beendet, erfolgt durch undifferenzierte Prokambiumzellen die Bildung eines Kambiums zwischen dem primären Xylem und primären Phloem (Abb. 2.1 W c). Aus dem sternförmigen Kambium wird allmählich ein ringförmiges. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, wird durch wiederholte Teilung der Zellen des Kambiums und die daraus resultierende Abgabe von Zellen nach Innen und Außen die

sekundäre Struktur aufgebaut (Abb. 2.1 W d). Das erstgebildete Periderm des Phellogens (**vgl. Kap. 2.2**) stammt vom Perizykel ab. Dieser Prozess führt in der Folge zu einer Abtrennung von primärer Rinde und Epidermis (Abb. 2.1 W e) (SITTE et al. 1998, RAVEN et al. 2000).

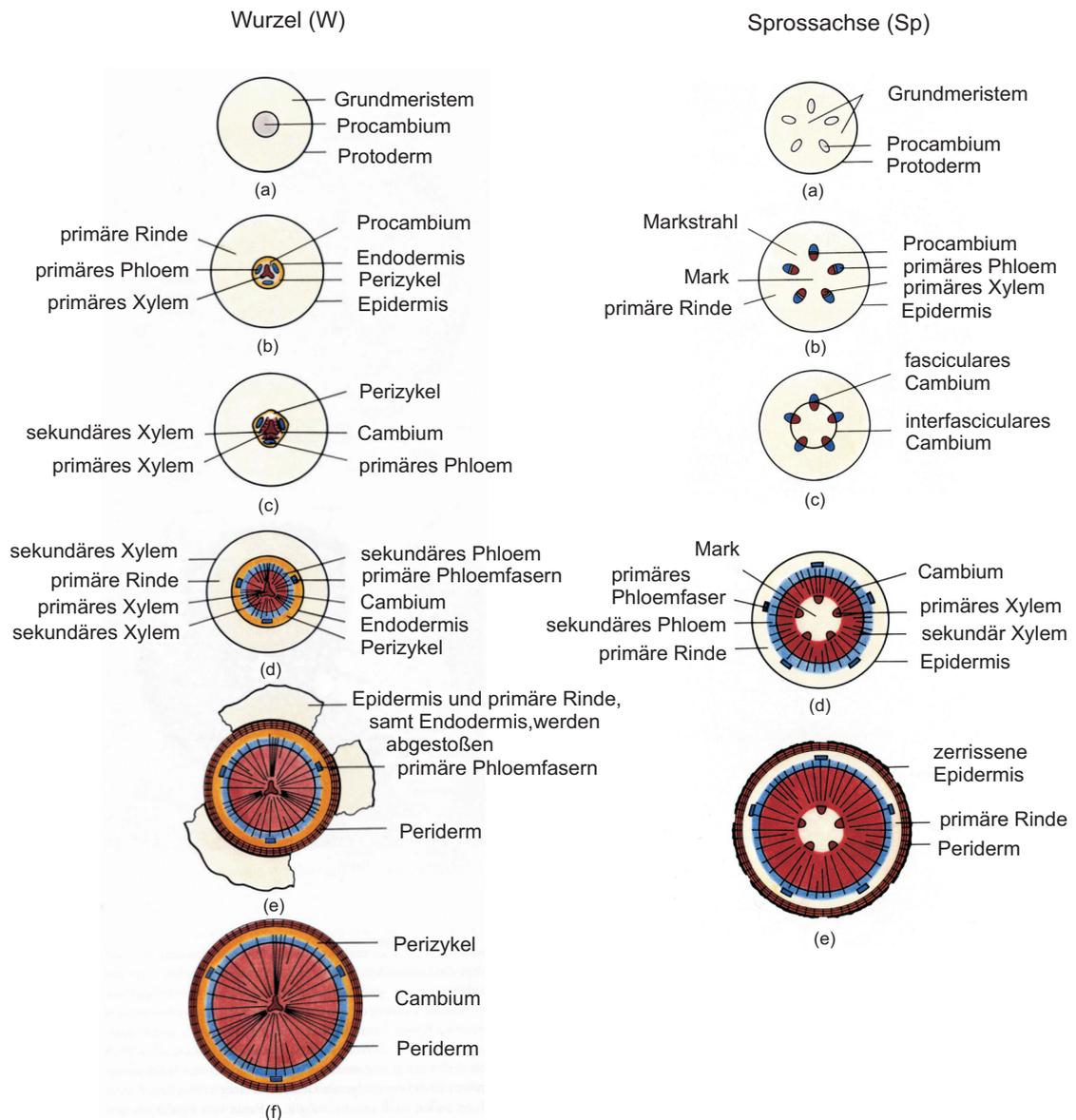


Abb. 2.1: Vergleich der Primär- und Sekundärstruktur von Wurzel- und Sprossachse am Beispiel einer dikotylen Holzpflanze (RAVEN et al. 2000: 639, 691; verändert).

### 2.1.2 Sprossachse

Das Grundgewebe der primären Sprossachse stellen primäre Rinde und Mark dar. Bei dicotylen Holzpflanzen sind rings um das Mark einzelne Leitbündel angeordnet (Abb. 2.1 Sp b). Dabei ist das primäre Xylem dem Mark zugewandt und das primäre Phloem der Rinde. In den Phloemsträngen verlaufen Siebröhren, Siebzellen mit Geleitzellen und Phlolemparenchym, die Xylemstränge setzen sich aus Tracheiden, Tracheen und Xylemparenchym zusammen (**vgl. Kap. 2.2**).

Zwischen den Leitbündeln in radialer Richtung sorgen primäre Markstrahlen für einen Stoffaustausch zwischen Rinde und Mark (BRAUN 1963). Das Kambium der Sprossachse ist im Unterschied zum Kambium der Wurzel von Anfang an ringförmig. Den innerhalb der Leitbündel gelegenen Teil des Kambiums bezeichnet man als faszikuläres Kambium, den in den Markstrahlen liegenden Teil als interfaszikuläres Kambium (Abb. 2.1 Sp c). Damit ist der primäre Aufbau der Sprossachse abgeschlossen (KAUSSMANN & SCHIEWER 1989).

Obwohl die primären Gewebe der Sprossachse ähnliche Wachstumsperioden durchlaufen wie die primären Gewebe der Wurzel, kann die Sprossachse nicht wie die Wurzel in eine Zellteilungszone, eine Streckungszone und Differenzierungszone unterteilt werden (vgl. Kapitel 2.4.1).

Das Längenwachstum der primären Sprossachse erfolgt durch eine Streckung der Internodien in axialer Richtung (RAVEN et al. 2000).

Das sekundäre Dickenwachstum und die daraus resultierenden Zell- und Gewebearten werden im nun folgenden Kapitel (**Kap. 2.2**) näher beleuchtet, da sie für das Verständnis dieser Arbeit von Bedeutung sind.

## 2.2 Anatomische Grundlagen der Dicotyledonen (Laubhölzer)

Laubhölzer sind gegenüber den stammesgeschichtlich älteren Nadelhölzern differenzierter aufgebaut. Bei Nadelhölzern erfüllen die Tracheiden eine Doppelfunktion. Sie sind für den Wassertransport und die Festigung verantwortlich. Dagegen stehen bei Laubhölzern für unterschiedliche Aufgaben entsprechende Zell – und Gewebearten zur Verfügung. Diese unterschiedlichen Zellen werden durch das Kambium gebildet. Definitionsgemäß bezeichnet man alles vom Kambium nach innen erzeugte Gewebe als Xylem (Holz), alles nach außen abgeschiedene als Phloem (Bast) (RAVEN et al. 2000, JACOB et al. 1994).

Abbildung 2.2 erlaubt einen Einblick in die räumliche Aufteilung der verschiedenen Zelltypen im Xylem und Phloem eines Laubholzstammes. Der Bau der einzelnen Zellelemente im Xylem ist an deren Funktion angepasst.

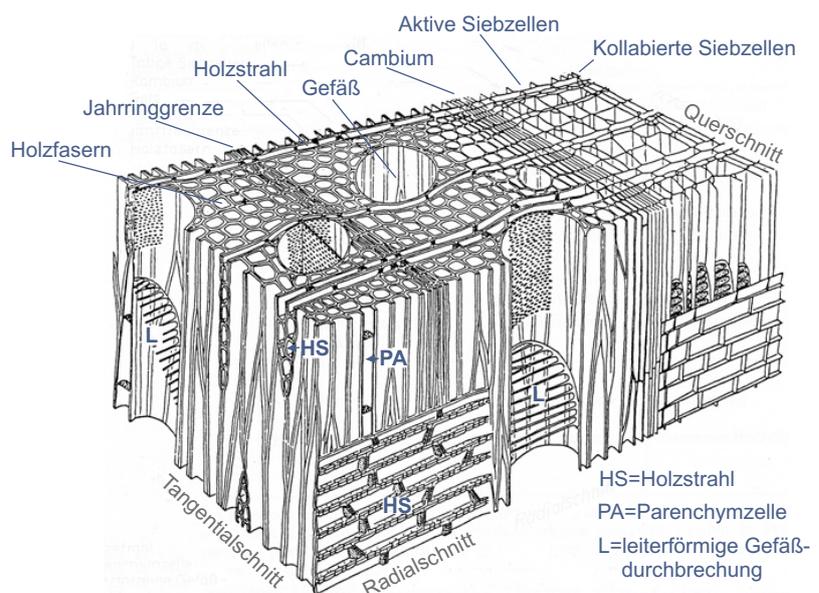


Abb. 2.2: Dreidimensionale Darstellung der Zellelemente im Xylem und Phloem eines Laubholzes (HUBER 1961, aus SCHWEINGRUBER 1996: 68).

In Tabelle 2.1 sind die verschiedenen Elemente und ihre Funktion aufgeführt. An dieser Stelle sei noch auf weiterführende Erläuterungen zu pflanzenphysiologischen Grundlagen in folgender Literatur hingewiesen: GROSSER (1977), HOPKINS (1995), KAUSSMANN & SCHIEWER (1989), LIBBERT (1987), NULTSCH (1991), RAVEN et al. (2000), SITTE et al. (1998), VON GUTTENBERG (1960, 1968).

Tab. 2.1: Anordnung, Form und Funktion der Laubholzzellen (GROSSER 1977).

	Zellarten	Form <sup>1</sup>	Hauptfunktion
Axial ausgerichtet	Gefäße	prosenchymatisch	Wasserleitung
	Gefäßtracheiden (vaskulare Tracheide, beidseitig geschlossen)	prosenchymatisch	Wasserleitung
	Längsparenchym	parenchymatisch	Speicherung
	Fasern		
	Libriformfasern	prosenchymatisch	Festigung
	Fasertracheiden	prosenchymatisch	Festigung
Radial ausgerichtet	Strahlenparenchym	parenchymatisch	Speicherung

<sup>1</sup>Als prosenchymatisch werden lang gestreckte Zellen mit spitz zulaufenden Enden bezeichnet. Die Elemente des Laubholzes können in Prosenchym (Gefäßglieder, Fasern) und in Parenchym mit backsteinförmigen Zellen eingeteilt werden.

Für die mechanische Festigkeit von Dicotyledonen sorgen längslaufende, dickwandige bzw. englumige Libriformfasern. Zusammen mit den Fasertracheiden werden sie als Fasern bezeichnet. Da Fasern außer im Holz auch in der Rinde vorkommen, kann in Holz- und Bastfasern unterschieden werden. Bei den meisten Hölzern liegt der Anteil an Holzfasern bei 50 bis 70% der Gesamtholzmasse. Die Buche gehört mit 30 bis 50% zu den Hölzern mit einem geringeren Faseranteil (Abbildung 2.3). Fasertracheiden stellen eine Übergangsform in der Entwicklung der Tracheiden zu Libriformfasern als eigentliches Festigungselement dar. Neben der Wanddicke und der Lumenweite dient die Art der Tüpfelung als markantes Merkmal zur Differenzierung der beiden Fasertypen. Als Tüpfel werden Öffnungen in der Zellwand bezeichnet, wodurch die einzelnen Lumina der Zellen miteinander in Verbindung stehen. Somit wird ein Wasser- und Stoffaustausch zwischen benachbarten Zellen ermöglicht (GROSSER 1977).

Im Allgemeinen nimmt die Wanddicke von der Tracheide über die Fasertracheide zur Libriformfaser zu und die Lumenweite ab. Die Länge der Laubholzfaser ist im Vergleich zu den Nadelholztracheiden wesentlich kürzer. Die mittlere Tracheidenlänge liegt zwischen 1,0 und 1,5 mm, dagegen finden sich bei Nadelhölzern Längen zwischen 2,9 mm (Fichte) bis 4,5 mm (Douglasie). Innerhalb derselben Laubholzart sind Fasertracheiden durchschnittlich etwas kürzer als Libriformfasern.

Wie bei Nadelhölzern übernimmt das axial verlaufende Längsparenchym und das radial ausgerichtete Holzstrahlparenchym die Speicherung der Nährstoffe. Das als Axialparenchym

bezeichnete Längsparenchym, auch kurz als Parenchym charakterisiert, hat verholzte, dünne Zellwände die sich auf Grund des größeren Lumens deutlich von den umgebenden Fasern des Grundgewebes abheben. Die lebenden Parenchymzellen, die erst bei der Verkernung des Holzes



Abb. 2.3: Ausschnitt (Querschnitt) aus dem Holz einer Buche (*Fagus sylvatica* L.).

absterben, treten in zahlreichen Anordnungsformen auf. Für die diagnostische Bestimmung der Holzart haben diese eine große Bedeutung.

Es können zwei Hauptverteilungstypen unterschieden werden: die apotracheale und paratracheale Parenchymverteilung.

Man spricht von apotrachealer Verteilung, wenn das Parenchym ohne direkten Kontakt zu den Gefäßen steht, im Gegensatz zur paratrachealen Verteilung, bei der Parenchymzellen an den Gefäßen

anliegen. In Abbildung 2.4 sind die verschiedenen Ausprägungen schematisch dargestellt. Bei Buche (*Fagus sylvatica* L.) sind die einzelnen Parenchymzellen oder Zellgruppen unregelmäßig zwischen den Fasern des Grundgewebes verteilt (GROSSER 1977, RAVEN et al. 2000). Diese diffuse Verteilung tritt auch bei anderen einheimischen Hölzern auf, z.B.: Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Birke (*Betula pentula*) und Edelkastanie (*Castanea sativa* Mill.).

Die aufgeführten Verteilungsmuster (vgl. Abb. 2.4) sind ausgewählte Beispiele und kommen nur selten einzeln in einer Holzart vor. Meist ist eine Kombination der unterschiedlichen Typen auszumachen. Weiterhin existieren zahlreiche Übergänge die die genaue Bestimmung erschweren und somit eine Einbeziehung anderer holzanatomischer Merkmale erfordern.

Das Holzstrahlenparenchym von Laubhölzern unterscheidet sich deutlich von dem der Nadelhölzer. Im Gegensatz zu den meist einreihigen Holzstrahlen der Nadelhölzer ist eine ausgesprochene Vielfalt bei den Laubhölzern in Form und Dimension der Zellreihen zu finden. Durchschnittlich treten 4 bis 10 Zellreihen breite Strahlen auf. Bei Eiche (*Quercus robur*) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) findet man Holzstrahlen

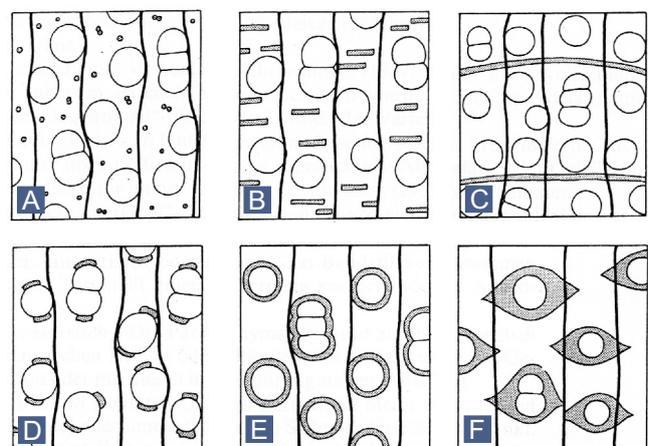


Abb. 2.4: Formen der Parenchymverteilung (A - F; schemat.): A - diffus; B - diffus gehäuft; C - marginal; D - spärlich; E - vasizentrisch; F - aliform (GROSSER 1977: 40; verändert).

mit Breiten bis über 20 Zellreihen. Neben den extrem breiten Strahlen finden sich zahlreiche einreihige Strahlen. Da die Breiten und Höhen der Holzstrahlen stark variieren und die einzelnen Zellen von Art zu Art unterschiedliche Querschnitte aufweisen, ist für die genaue Artdiagnostik ein Tangentialschnitt notwendig. (BRAUN 1988, JACOB et al. 1994, RAVEN et al. 2000) Gefäße bzw. Tracheen sind in Längsrichtung angeordnete röhrenartige Zellreihen mit meist rundlichem Querschnitt, bestehend aus zahlreichen Gefäßgliedern oder Gefäßelementen mit teilweise oder völlig aufgelösten Querwänden, dienen sie dem ungehinderten Wassertransport. Als tote Zellen besitzen die Gefäßelemente keine Protoplasten mehr. Weiterhin sind ihre Wände verholzt. Die Längen der Gefäße variieren stark, sind abhängig von der Baumart und werden von nicht aufgelösten Querwänden markiert. Bei *Fagus sylvatica* L. können die aus Gefäßgliedern bestehenden Zellreihen 0,8 bis 2,0 m lang werden. Aber auch Längen von 5 bis 18 m sind möglich wie z.B. bei *Quercus robur* (BRAUN 1988).

Für die holzanatomische Bestimmung ist die Größe und Verteilung der Gefäße im Querschnitt ein weiteres wichtiges Merkmal. Dabei kann man bei Laubhölzern folgende Arten unterteilen: ringporige, zerstreutporige und halbringporige Hölzer (Abbildung 2.5).

Bei ringporigen Hölzern liegen die weitleumigen Frühholzgefäße längs der Jahrringgrenze in ein bis zwei tangentialen Reihen. Die wesentlich engeren Spätholzgefäße sind unregelmäßig über die Jahrringfläche verteilt. Der Größenunterschied zwischen Frühholz- und Spätholzgefäßen kann im im Querschnitt das 10fache erreichen. Vertreter dieser Gattung sind z.B. Eiche, Esche, Edelkastanie und Ulme.

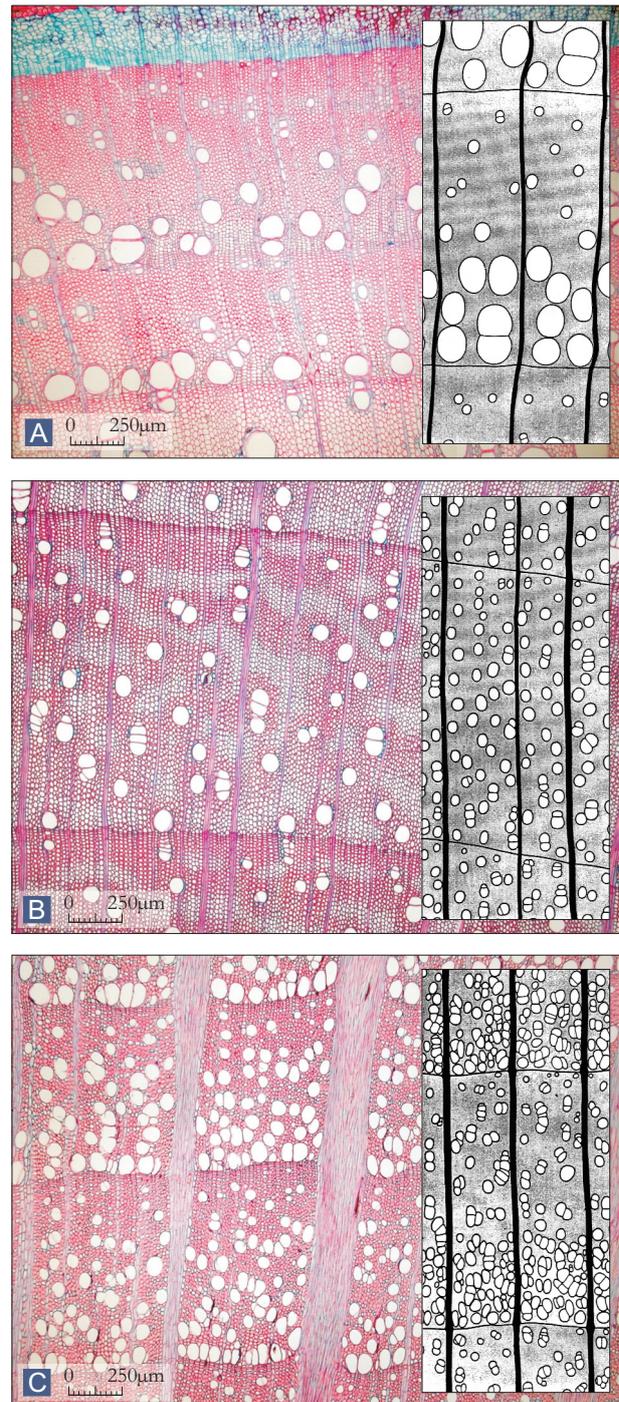


Abb. 2.5: Beispiele für Laubholztypen: A - Esche (ringporig); B - Ahorn (zerstreutporig) und C - Buche (halbringporig). In der Gegenüberstellung werden die unterschiedlichen Verteilungsmuster der Gefäße innerhalb des Jahrrings deutlich (schemat. Darst. GROSSER 1977: 31; verändert).

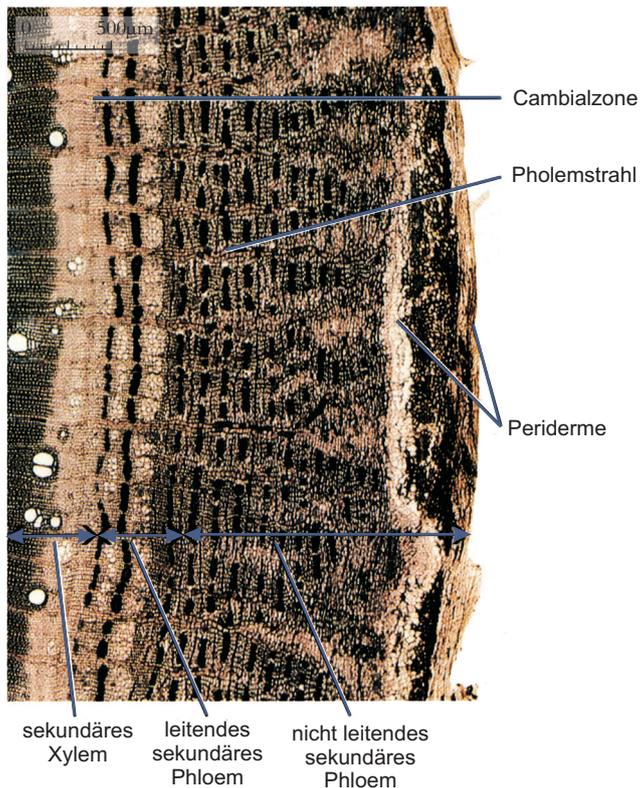


Abb. 2.6: Querschnitt durch die Rinde eines Robinienstammes *Robinia pseudoacacia* (RAVEN et al. 2000: 696).

Die Durchmesser der Frühholz- und Spätholzgefäße im Stamm von zerstreutporigen Hölzern weisen annähernd dieselbe Größenordnung auf (Buche, 30 - 50 µm; Linde, 20 - 70 µm) und sind gleichmäßig über den Jahrring verteilt. Beispiele für zerstreutporige Hölzer sind Ahorn, Pappel, Weide, Erle und Linde. BOSSHARD & KUCERA (1973), aber auch GROSSER (1977), sprechen von der Buche (*Fagus sylvatica* L.) als zerstreutporiges Holz. SCHWEINGRUBER (1996, 2001) ordnet dagegen die Buche als halbringporiges Holz ein.

Eine Mittelstellung nehmen die halbringporigen Hölzer ein. Die Frühholzgefäße können in einer einzigen tangentialen Reihe angeordnet sein und einen Größenunterschied zu

den Spätholzgefäßen um den Faktor 2 aufweisen. Jedoch sind auch andere Strukturvariationen zu finden wobei die typische Reihung der Gefäße entlang der Jahrringgrenze fehlt. Dabei wird die Struktur eines halbringporigen Holzes durch ein deutlich erhöhtes Aufkommen von kleineren Gefäßen im Frühholz und einer reduzierten Gefäßanzahl im Spätholz erzeugt. Die einzelnen Gefäße weisen in diesen Fall keinen markanten Größenunterschied auf. (BOSSHARD & KUCERA 1973; SITTE et al. 1998; RAVEN et al. 2000)

Gefäße, Holzstrahlen, Längsparenchym und Fasern ergeben durch ihren gesamt variierenden Bau und ihre unterschiedliche Anordnung eine Fülle verschiedener Strukturbilder, durch die zumindest jede Gattung der einheimischen Gehölze eindeutig charakterisiert ist (GROSSER 1977; SCHWEINGRUBER 2001).

Die äußere Schutzschicht bei Stamm und Wurzel bildet die Rinde. Dieses vom Kambium nach außen hin gebildete Zellgewebe, kann wie folgt untergliedert werden (Abbildung 2.6):

- das Phloem, auch als Innenrinde oder Bast bezeichnet und
- das schützende Abschlussgewebe das Periderm, die Außenrinde.

Innerhalb des Phloems gibt es verschiedene morphologische und physiologische Zonen. Unmittelbar am Kambium finden sich wenige Zellreihen mit funktionstüchtigen Siebröhren. Diese transportieren die durch Photosynthese produzierten Assimilate und in Wasser gelöste organische Stoffe zu den Orten des Verbrauches, den wachsenden Spross- und Wurzelspitzen und Speicherorten wie den Speicherparenchymzellen (GROSSER 1977).

Dieser im Allgemeinen abwärts gerichtete Stofftransport, unterscheidet sich von der aufwärts gerichteten Leitung von in Wasser gelösten anorganischen Stoffen und Mineralien in den Tracheen und Gefäßtracheiden des Xylems. Im Gegensatz zu diesen Gefäßen sind die Zellwände der Siebröhren gänzlich unverholzt und weitgehend nicht verdickt. Sie bestehen aus übereinander angeordneten Zellgliedern und sind durch perforierte Querwände miteinander verbunden.

Typisch für Laubhölzer sind die mit Plasma gefüllten und einen großen Zellkern besitzenden Geleitzellen. Wie der Name schon verdeutlicht, kommen diese Zellen in unmittelbarer Nachbarschaft der Siebröhren vor. Gleich außerhalb dieser aktiven Zone ist die Funktionstüchtigkeit der Siebröhren aufgehoben, da sie kollabiert sind (GROSSER 1977, RAVEN et al. 2000).

Weiterhin sind im Phloem axiale aber auch radiale Parenchymzellen zu finden. Wobei das radiale Rindenstrahlenparenchym eine Fortsetzung der Holzstrahlen ist.

Zum Schutz vor Verletzung, Austrocknung, Frost und Hitze wird ein Abschlussgewebe gebildet, das Periderm (Außenrinde). Dabei erzeugt das Phellogen nach außen hin Phellemzellen und nach innen parenchymatische Phellodermzellen. Durch Dilatation der Rindenstrahlen passt sich der Stamm an die Vergrößerung des Baumumfanges an. Bei starker Ausbildung des Phellems bildet sich Kork. Die Buche ist eine der wenigen Baumarten die nur ein Periderm bildet, welches für die gesamte Lebensdauer des Baumes erhalten bleibt. Bei anderen Arten hingegen werden weitere Periderme ausgebildet, so genannte Folgeperiderme, die zur Bildung unterschiedlicher Borkenformen führen. (HOLDHEIDE 1951, ESAU 1969, ESCHRICH 1995).

### 2.3 Beeinflussende Faktoren auf das Wachstum von Stamm- und Wurzelholz

Das Wachstum von Stamm- und Wurzelholz wird von endogenen und exogenen Faktoren bestimmt (Tabelle 2.2, vgl. BRÄKER 1981, BRÄUNING 1995, HARTIG 1882, 1898, KRAUSE 1992, LARCHER 1994, MITSCHERLICH 1975, SASS 1993, SCHWEINGRUBER 1996).

Tab. 2.2: Endogene und Exogene Faktoren

#### Endogene Faktoren:

- Baumart
- Alter
- Stoffwechsel
- hormonale Steuerung
- Assimilation
- Kronenausformung
- Einflüsse aus dem Vorjahr

#### Exogenen Faktoren:

- Witterung/Klima
- Boden
- Nährstoffe
- Pflanzengesellschaft
- Konkurrenz
- Lichtverhältnisse
- mechanischer Stress

Pflanzenhormone spielen eine wichtige Rolle bei der Wachstumsregulation. Die Bildung der Hormone erfolgt in den Apikalmeristemen der Wurzel und Sprossachse. Nach RAVEN et al. (2000) können fünf Phytohormongruppen unterschieden werden: Auxine, Cytokinine, Ethylen, Abscisinsäure und Gibberelline. Diese Pflanzenhormone werden in sehr geringer Konzentration wirksam und nehmen regulierenden Einfluss auf das Wachstum von Geweben (RAVEN et al. 2000, ROBERTS et al. 1988, SITTE et al. 1998).

Der Stoffwechsel und die damit verbundene Bildung von Assimilaten in den photosynthetisch aktiven Blättern und der Weitertransport zu den Orten des Verbrauchs erfolgt über das Phloem (vgl. Kap. 2.2.). Nach TROENG & LINDER (1982) werden ca. 50% der Assimilate für den Aufbau der Feinwurzeln genutzt, während nur 5% für das Stammwachstum verbraucht werden.

Dies erklärt die schnelle Überwallung von Verletzungen durch das Wurzelkambium. Vor allem in den Monaten Juni bis September verzeichnete KRAUSE (1992) eine hohe Aktivität innerhalb eines Buchenreinbestandes in Norddeutschland (0-50 m über NN). Auch Verletzungen am Stamm bei *Fagus sylvatica* L. werden in diesem Zeitraum schneller abgeschottet und überwält (DUJESIEFKEN & LIESE 1990, WILCOX 1954).

Nach der Verwundung des Baumes bis in das Xylem, wird durch die Zellteilung wundnaher Kambial- und Holzstrahlzellen ein Kallusgewebe gebildet. Weiterhin erfolgt durch Kompartimentierung (siehe unten, Verthyllung) ein Abschluß gegen eindringende Luft, aber auch eine Abschottung gegen Mikroorganismen. Dem folgt die Ausdifferenzierung einer Überwallungswulst, welche die Wundfläche abschließt. Dieser Prozess kann je nach Größe der Verletzung mehrere Jahre dauern (DUJESIEFKEN 1991).

Verletzungen an Bäumen können Verfärbungen nach sich ziehen. Diese Veränderung der Gewebestruktur in Stamm und Wurzel entsteht durch Einlagerung von akzessorischen Substanzen in den Zelllumina von Parenchym, Fasern und Gefäßen (BAUCH et al. 1980). BOSSHARD (1967) stellte fest, dass diese Wundreaktion bei Buche (*Fagus sylvatica* L.), allein durch injizierten Sauerstoff ohne Beteiligung von Mikroorganismen erzeugt werden kann. Die Synthese der akzessorischen Substanzen, erfolgt durch physiologisch aktive Parenchymzellen.

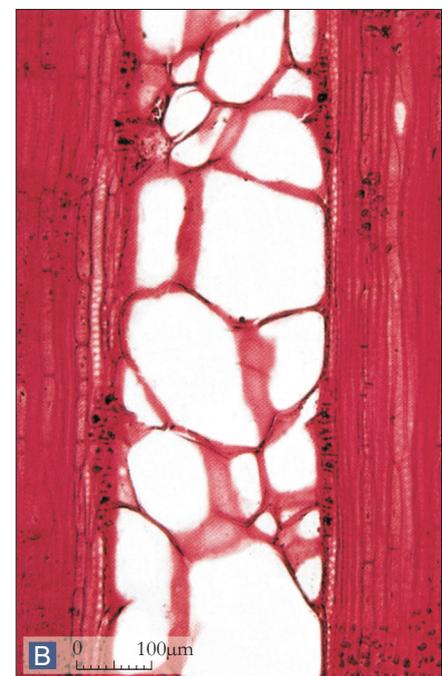
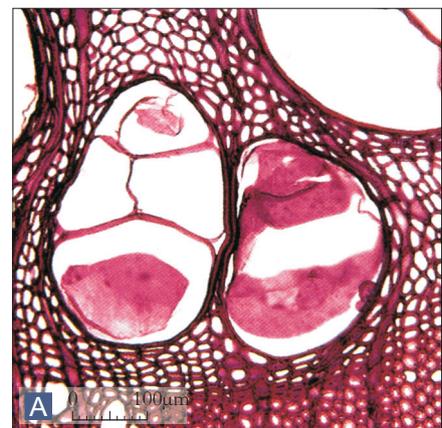


Abb. 2.7: Thyllen, blasenartige Auswüchse von Parenchymzellen, die ganz oder teilweise das Gefäßlumen verstopfen. Querschnitt (A) und Längsschnitt (B) durch das Holz einer Weiß-Eiche (*Quercus alba*) (RAVEN et al. 2000: 708).

Für die Effektivität der Abschottung ist das Verhältnis von Parenchym- zu Gefäßanteil wichtig. *Fagus sylvatica* L. hat neben dem Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) einen hohen Parenchymanteil und zählt damit zu den gut abschottenden Baumarten. Durch den Verschluss der unterbrochenen Gefäßstränge (Abbildung 2.7) sichert der Baum zuerst den Transpirationsstrom, erst später werden die aufgegebenen Xylembereiche von Mikroorganismen befallen (DUJESIEFKEN 1989). Dieser auch als Kompartimentierung bezeichnete Vorgang der Bildung von Thyllen ist unter anderem ausführlich bei CHATTAWAY (1949) und SCHMID & MACHADO (1968) beschrieben.

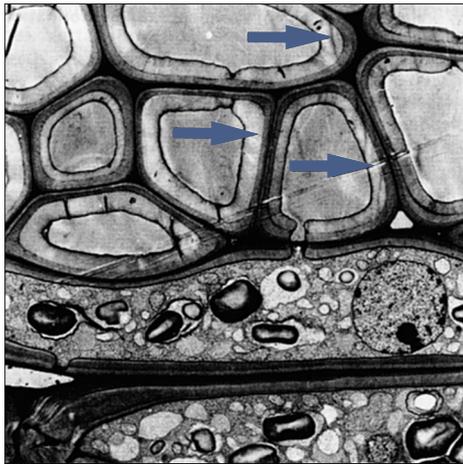


Abb. 2.8: Zugholzfasern bei Robinie (*Robinia pseudoacacia*) mit rein cellulose-haltigen sogenannten Gelatinösen Schichten (Pfeile), 2000fach (LOHMANN 2003: 246).

Äußere Einflüsse müssen nicht immer eine Verletzung nach sich ziehen. Zeigt ein Stamm eine deutliche Neigung bzw. Schrägstellung so kann dies auf eine Bewegung des Untergrundes zurückgeführt werden. Auftretenden Exzentrizitäten im Jahrringbild, Bildung von Reaktionsgewebe sind mögliche Reaktionen des Baumes auf diesen Fremdeinfluss.

Das Reaktionsgewebe der Laubgehölze wird als Zugholz, oder wegen dessen heller Färbung, aufgrund des geringen Ligningehaltes, auch als Weißholz bezeichnet. Es kommt an der durch Zug beanspruchten Seite vor, wie z.B. an der Oberseite des Stammes bei Schrägstellung.

Holzanatomisch zeigt sich eine gelantinöse Schicht innerhalb der Sekundär- oder Tertiärwand der Libriformfasern (Abbildung 2.8). Diese besteht aus fast reiner Cellulose und sorgt für eine hohe Längsschwindung des Zugholzes (WAGENFÜHR 2000). Gelatinöse Schichten treten nur in Holzfasern (Libriform, Fasertracheiden und Tracheiden), nie in Parenchymzellen (axiales Parenchym, Holzstrahlen) auf (SCHWEINGRUBER 2001).

Durch das zunehmende Alter eines Baumes werden radiale anatomische Unterschiede hervorgerufen. So sinken nach Angaben von SCHULTZ (1957) bei Buchen mit dem Alter die Jahrringbreite und der Faseranteil bei gleichzeitig ansteigendem Gefäßanteil. Hinzu kommt eine Änderung der Verhältnisse Zellwand zu Zelllumen. Bei 90-jährigen Buchen wurde ein geringerer Gefäßlumenanteil dafür aber ein höherer Faserlumenanteil im Verhältnis zur jeweiligen Zellwand festgestellt.

Das Wachstum und die Gestalt eines Baumes werden durch das vorgegebene Erbgut geprägt. Genetische Faktoren bestimmen die Grundstruktur der Gewebe. Holzstruktur und Jahrringbild sind einer Variabilität unterworfen, letztlich bleibt das Arttypische (z.B. Zerstreut- oder Ringporigkeit, Zellwandstrukturen) jedoch stets erhalten (SCHWEINGRUBER 1996).

An dieser Stelle soll auf wichtige exogene Faktoren eingegangen werden, die unter anderem für die Ausprägung der Wurzelholzanatomie von entscheidender Bedeutung sind.

Für den ganzen Baum (inkl. Wurzel) gilt, dass der Beginn aller Wachstumsvorgänge im Frühjahr von der Temperatur abhängt (LADEFOGED 1939). KRAUSE (1992) stellte fest, dass Wurzeln auf Niederschlag des aktuellen Jahres reagieren, nicht aber auf die Temperatur. Der Stamm reagiert dagegen auf den Niederschlag des Vorjahres und die Temperatur des aktuellen Jahres (KRAUSE & ECKSTEIN 1993, KRAUSE 1992).

Nach BOSSARD (1974) beginnt das sekundäre Dickenwachstum der Wurzel bei einer Mindesttemperatur im Boden von 10°C bis 13°C. Der Beginn der kambialen Aktivität bei Wurzeln zerstreutporiger Laubhölzer setzt im Vergleich zur Sprossachse etwa vier bis sechs Wochen später ein. Der Austrieb von Knospen bei Buche beginnt im Frühjahr wenn die Bodentemperatur im Wurzelraum über 7°C erreicht hat (ELLENBERG et al. 1986).

Allgemein durchläuft das Wurzelwachstum verschiedene Phasen. Es wechseln sich stärkere Phasen mit Ruhephasen ab. Dabei spielen Wasserdefizit und eine mangelnde Assimilatezufuhr eine entscheidende Rolle (NELSON 1964, KRAUSE 1992). Die wichtigsten Faktoren die das Wurzelwachstum beeinflussen, sind Temperatur, Feuchtigkeit und Sauerstoff, aber auch Licht (FAYLE 1968, KRAMER & KOZLOWSKI 1960, LARCHER 1987, LYR 1996, SCHNELLE et al. 1989).

Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) ist die Temperaturverteilung im Boden von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität abhängig. Beeinflusst werden diese Größen von der Bodenbedeckung, Bodenfarbe, Neigung und Exposition. Die Evapotranspiration der einzelnen Bodentypen sorgt für eine Variabilität der Temperatur in den oberen Bodenschichten (15-20 cm) und ist abhängig von der Bodenfeuchte. Nach KRAUSE (1992) reagieren tiefer liegende Wurzeln (ab 50-60 cm Tiefe) weniger auf Temperaturschwankungen, dafür vor allem auf Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode. Der Tagesgang der Temperatur ist ab einer Tiefe von 60 cm nicht mehr relevant (LARCHER 1987), beeinflusst folglich das Wachstum der Wurzeln in keiner Weise.

Einen Vergleich nicht freigelegter und freigelegter Wurzelstrukturen von *Fagus sylvatica* L. beschreibt erstmals KNY (1908). Er stellt bei den freigelegten Wurzelteilen eine erhöhte Exzentrizität und kleinere Gefäßgrößen fest. Die möglichen Gründe, z.B. der Einfluss von Temperatur oder Licht, werden nicht beschrieben. Nur wenige Arbeiten befassen sich mit dem Einfluss von Licht auf das Holz des Stammes bzw. der Wurzel. Mit dem Einfluss von verschiedenen Wellenlängen auf das Wurzelwachstum beschäftigte sich umfangreich FAYLE (1968). Er konnte einen differenzierten Zuwachs bei unterschiedlich farbigen Folien (rot, blau, klar, schwarz) belegen. Die höchste Zuwachssteigerung wurde bei roter Folie nachgewiesen.

Freileigungsreaktionen durch unterschiedliche geomorphologische Prozesse hat GÄRTNER (2003) anhand von Koniferenwurzeln (*Larix decidua* Mill., *Picea abies* (L.) Karst., *Pinus cembra* ssp. *Sibirica*, *Pinus sylvestris* L.) untersucht. Dabei konnte er eine Reduzierung der Größe der Frühholzzellen um 50% als Freileigungsmerkmal bestimmen. Der Wurzelanlauf wurde hierbei

ausgespart, da in diesem Bereich die Stabilität des Baumes durch exzentrisches Wachstum der Wurzeln verbunden mit Druck- bzw. Zugholz gewährleistet wird (FAYLE 1968,1976). Nach KRAUSE & ECKSTEIN (1993) lässt der Stammeinfluss auf die horizontalen Wurzeln ab 100 bis 110 cm bei *Fagus sylvatica* L. nach.

## 2.4 Funktionen von Wurzeln, Ausbreitung der Wurzeln im Untergrund

Die Bewurzelungsform der Buche ist als Herzwurzel-System ausgebildet (KÖSTLER et al. 1983). In den ersten Lebensjahren bildet der Baum eine Pfahlwurzel senkrecht nach unten aus. An ihr entstehen in akropedaler Richtung Seitenwurzeln die sich weiter verzweigen. Das entstehende Wurzelsystem wird als allorhiz bezeichnet. Die wichtigsten Funktionen der Wurzel können wie folgt zusammengefasst werden (BIDWELL 1991, GÄRTNER 2003, HOPKINS 1995, KUTSCHERA et al. 1997, LIBBERT 1987, RAVEN 2000, SITTE et al. 1998):

- Verankerung der Pflanze im Boden
- Ausbreitung im Untergrund, gesteuert durch interne und externe Faktoren (siehe unten)
- Absorption von Wasser und Nährsalzen, Weitertransport zu den Orten des Verbrauchs
- Speicherung von Assimilaten aus dem Spross, Remobilisierung bei Anforderung
- Stoffausscheidung über die Wurzelspitze zur Mineralanreicherung im umgebenen Substrat
- Symbiotische Assoziation zwischen Pilzen und Bakterien – Mycorrhizen, Erreichbarkeit eines größeren Bodenvolumens wird realisiert

Das Längenwachstum der Wurzel erfolgt in einem nur wenige Millimeter langen Bereich, genauer der Zellstreckungszone (Abbildung 2.9). Hinter dieser Zone wächst die Wurzel nicht mehr in die Länge. Das heißt, nur dieser kleine Teil der Wurzelspitze ist imstande in das Substrat vorzudringen. Der Zellstreckungszone vorgelagert ist die Zellteilungszone mit dem Apikalmeristem. Die Spitze der Wurzel wird von einer Masse aus Parenchymzellen geschützt, der Kalyptra (Wurzelhaube). Beim Durchdringen des Untergrundes wird von den Wurzelhaubenzellen eine Substanz aus stark hydratisierten Polysaccharidmolekülen abgesondert, die durch ihre schleimige Konsistenz die Reibung zwischen Erdreich und Wurzel herabsetzt.

Nach der Zellstreckungszone folgt die Differenzierungszone, auch Wurzelhaarzone genannt. Die hier gebildeten Wurzelhaare sind röhrenartige Ausstülpungen der Epidermiszellen, durch die die Absorptionsfläche der Wurzel um ein vielfaches erhöht wird. In diesem Bereich des teilweise oder völlig ausdifferenzierten Wurzelgewebes werden die jungen Sekundärwurzeln im Perizykel (vgl. Abb. 2.1 W d) angelegt (RAVEN et al. 2000).

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Wurzelspitze ist die Fähigkeit der Perzeption des Schwerereizes. Diese Wahrnehmung erfolgt über die Columella (zentraler Teil der Wurzelhaube), einem Gewebe aus Zellen mit Amyloplasten. Nach der Statolithentheorie dienen diese stärkehaltigen Plastiden als Schwerkraft-Sensoren. Allerdings werden noch zwei weitere Theorien in der Literatur diskutiert, die Theorie des hydrostatischen Drucks und der Plasmamembran vermittelten Perzeption. Weitergehende Ausführungen finden sich bei HODICK et al. 1998 RAVEN et al. 2000 und SIEVERS et al. 1996.

Der als Gravitropismus bezeichnete Schwerereiz kann je nach Reaktion der Wurzel oder des Sprosses auf die Schwerkraft, in positiven und negativen Gravitropismus unterschieden werden.

Eine weitere Form der Reaktion auf externe Reize ist der Phototropismus. Darunter versteht man die Krümmung eines Sprosses in Richtung des Lichtes. Je nach Intensität des Reizes erfolgt eine positiv phototrope Reaktion des oberirdischen Bereiches der Pflanze. Wurzeln hingegen reagieren negativ phototrop (RAVEN et al. 2000). Die Umsetzung der beeinflussenden Tropismen ist nur an physiologisch aktiven Pflanzenteilen möglich. Dabei spielt die Verteilung der Auxinkonzentration im Spross oder in der Wurzel für ein gerichtetes Wachstum eine entscheidende Rolle. Auxin fördert das Streckungswachstum von Zellen, kann aber auch hemmend wirken, u.a. auf das Wachstum des Wurzelsystems. In der Fachliteratur wird auch Calcium, speziell das Calcium-bindende Calmodulin als vermittelndes Protein erwähnt. Es reichert sich an der Unterseite der liegenden Wurzel an, bevor sich die Wurzel in diese Richtung krümmt. An dieser Stelle sei auf weitere Fachliteratur verwiesen (u.a. RUSSELL 1977, ROBERTS & HOOLEY 1988, KONINGS 1995, RASHOTTE et al. 2000) die diese spezielle Thematik näher ausführten.

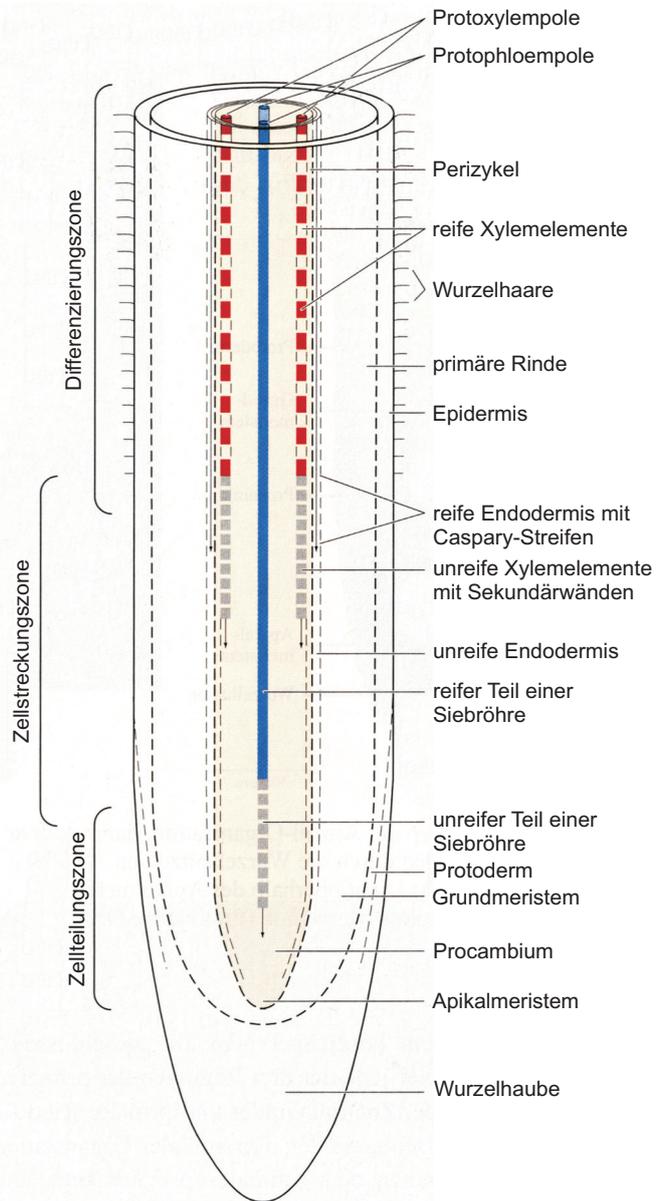


Abb. 2.9: Schematische Darstellung der frühen Entwicklungsstadien einer Wurzelspitze. (RAVEN et al. 2000: 632).

Darüber hinaus ist Calcium bei der Induktion des Hydrotropismus beteiligt. Hierbei handelt es sich um eine Richtungsänderung der Wurzel, hervorgerufen durch ein höheres Wasserpotential im Boden (RAVEN et al. 2000).

Neben den erwähnten positiv und negativ ausgerichteten Tropismen existieren weitere Zwischenvarianten. Von Plagiotropismus spricht man, wenn das Wachstum einer Wurzel (Seitenwurzeln 1. Ordnung) in einem bestimmten Winkel zum Reiz erfolgt. Agravitrop, also von der Schwerkraft nicht beeinflusst, sind Seitenwurzeln 2. oder höherer Ordnungen. Regiert die Pflanze auf einen Reizeinwirkung mit einem Winkel von  $90^\circ$  dann spricht man von Transversal-Tropismus (LIEBERT 1987, RAVEN et al. 2000, SITTE et al.1998)

Die Orientierung der Wurzel im Bodensubstrat wird weiterhin durch die unterschiedlich verteilten  $O_2$ - oder Nährstoffkonzentrationen beeinflusst. Die Nährstoffverfügbarkeit im Boden, neben der Einwirkung der Gravitation einer der dominierenden Faktoren, ist abhängig vom Ausgangsgestein, den bodenbildenden Prozessen, aber vor allem von der Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe (PORTERFIELD & MUSGRAVE 1998). Nur 0,2% des Nährstoffvorrates liegt im Boden in gelöster Form vor. Weitere 2% sind an den Oberflächen des Bodensubstrates adsorbiert und ca. 97% in Huminstoffen oder Mineralien fest gebunden (HEINRICH 1994, LARCHER 1994).

### 3. Charakteristik der Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe

Im Folgenden werden Formen und Prozesse von Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe beschrieben. Die für die Arbeit relevanten Details zu Massenverlagerungen in diesem Naturraum werden näher ausgeführt. Ferner sei an dieser Stelle auf entsprechende Literatur zu diesem Themenfeld hingewiesen (u.a. ACKERMANN 1958,1959,1977, BAUM & SCHMIDT 2001, BEYER 2002a, BEYER 2002b, JOHNSEN 1974, 1981, JOHNSEN & KLENGEL 1973, JOHNSEN & SCHMIDT 2000, KIRBIS 1950, PASEK 1974, PLASSE 1924, SCHMIDT 1988b, SCHMIDT & BEYER 2001, SCHMIDT & BEYER 2002, WENZEL 1994).

Nach Glade (2005) werden Massenverlagerungen wie folgt definiert:

„Mass movement involves the outward or downward movement of a mass of slope-forming material, under the influence of gravity. Although water and ice may influence this process, these substances do not act as primary transportational agents.“ (GLADE et al. 2005: 783).

Massenverlagerungen sind ein typisches Phänomen der Wellenkalk-Schichtstufe (JOHNSEN & SCHMIDT 2000). Das Aufkommen der Massenverlagerungen wird durch eine Vielzahl von Faktoren gesteuert, die gleichzeitig auftreten können und sich durch Wechselbeziehungen beeinflussen (BEYER 2002b). Es können interne und externe (auslösend) wirkende Faktoren unterschieden werden. Die intern wirkenden Faktoren werden nach SCHMIDT & BEYER (2001), auch als dispositive Steuerungsfaktoren bezeichnet. Eine umfassende Untersuchung solcher morphometrischen und klimatologischen Steuerungsfaktoren wurde durch BEYER (2002b) an der Wellenkalk-Schichtstufe durchgeführt. Als generelle Faktoren dieser Art gelten u.a. geologisch-strukturelle und morphometrische Eigenschaften des Hanges, Verwitterung (physikalische, chemische, biologische), Erosion (z.B. fluvial), klimatische Verhältnisse (Niederschlag, Temperatur) und die Schwerkraft (GRUNERT & SCHMANKE 1997, SCHMIDT & BEYER 2001). Diese Faktoren können indirekt und langfristig die Verlagerungswahrscheinlichkeit eines Hanges beeinflussen (SCHMIDT 1988b), wobei sie in unterschiedlicher Ausprägung das Auftreten von Massenverlagerungen determinieren. Allerdings ist die Wirkung des einzelnen Faktors im Bezug auf den auslösenden Moment nur schwer zu ermitteln (BEYER 2002b).

Dagegen ist der Einfluss von externen Faktoren besser nachzuweisen, da oftmals zwischen dem auslösenden Element und dem Ereignis ein zeitlich enger Bezug besteht (KRAUTER 1990). Zu den auslösenden externen Faktoren zählen u.a. seismische Aktivitäten, anthropogene Einflüsse, extreme Niederschlagsereignisse und daraus folgend, wechselnde Hangwasserregime (PLATE et al. 1993, KRAUTER 1990, SCHMIDT 1988b, SCHMIDT & BEYER 2002, WIECZOREK & GLADE 2005).

Auch die Verbreitung und das Auslösen der Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe ist wie in der Definition von GLADE (2005) formuliert, eng an die Verteilung und Stärke des Niederschlags gebunden. BEYER (2002b) stellt heraus, dass mittlere Jahresniederschlagshöhen ab

750 mm zu einem erhöhten Aufkommen von Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe führen. Erst die hierdurch erfolgte hohe Durchfeuchtung und die damit verbundene Destabilisierung des Rötsockels, bildet die Grundlage für auslösende, extreme Starkregenereignisse (SCHMIDT & BEYER 2002).

Massenverlagerungen zeichnen sich durch verschiedene Bewegungsmechanismen aus. Zahlreiche Publikationen beschäftigen sich mit der Klassifizierung und Einordnung der auftretenden Bewegungsarten bei Massenverlagerungen (DIKAU et al. 1996, EPOCH 1993, HUTCHINGSTON 1988, KRAUTER 1990, UNESCO 1993)

Auf der Grundlage von DIKAU et al. (1996) und UNESCO (1993) können Massenverlagerungen, wie in Tabelle 3.1 dargestellt unterschieden werden.

Tab. 3.1: Klassifikation von Massenverlagerungen nach (DIKAU et al. 1996: 3), basierend auf EPOCH (1993).

Type	Rock	Debris	Soil
<b>FALL</b>	rock fall	debris fall	soil fall
<b>TOPPLE</b>	rock topple	debris topple	soil topple
<b>SLIDE</b> (rotational)	single (slump)	single	single
	multiple	multiple	multiple
	successive	successive	successive
<b>SLIDE</b> (translational)			
	non-rotational	block slide	block slide
planar	rockslide	debris slide	mudslide
<b>LATERAL SPREADING</b>	rock spreading	debris spread	soil (debris) spreading
<b>FLOW</b>	rock flow	debris flow	soil flow
<b>COMPLEX</b>	e.g. rock avalanche	e.g. flow slide	e.g. slump/earthflow

Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe können in erster Linie der in Tabelle 3.1 aufgeführten Klassifikation „Rock“ zugeordnet werden (SCHMIDT & BEYER 2001), wobei horizontales Driften (Spread) bzw. Gleiten (Slide) und das damit verbundene Kippen (Topple), mit Translation, Rotation und komplexen-internen Bewegungen (Abbildung 3.1), die am häufigsten vorkommenden Bewegungsarten sind (BEYER 2002b). Nach JOHNSEN UND KLENGEL (1973) werden Drift- und Gleitbewegungen auch als Blockverlagerung bezeichnet. Die Bewegung dieser Wellenkalkblöcke verläuft meist mit sehr langsamer Geschwindigkeit und liegt bei wenigen Millimetern pro Jahr. Fließbewegungen sind ausschließlich im plastifizierten Rötmaterial an der Basis des unteren

Wellenkalkes zu finden (BEYER 2002b). Sturzbewegungen in Form von Steinschlag oder Felssturz sind vor allem an steilen Hängen der Wellenkalkschichtstufe anzutreffen. Wobei Felsstürze seltener auftreten, jedoch das höchste Gefahrenpotential aufweisen. (BEYER & SCHMIDT 2002).

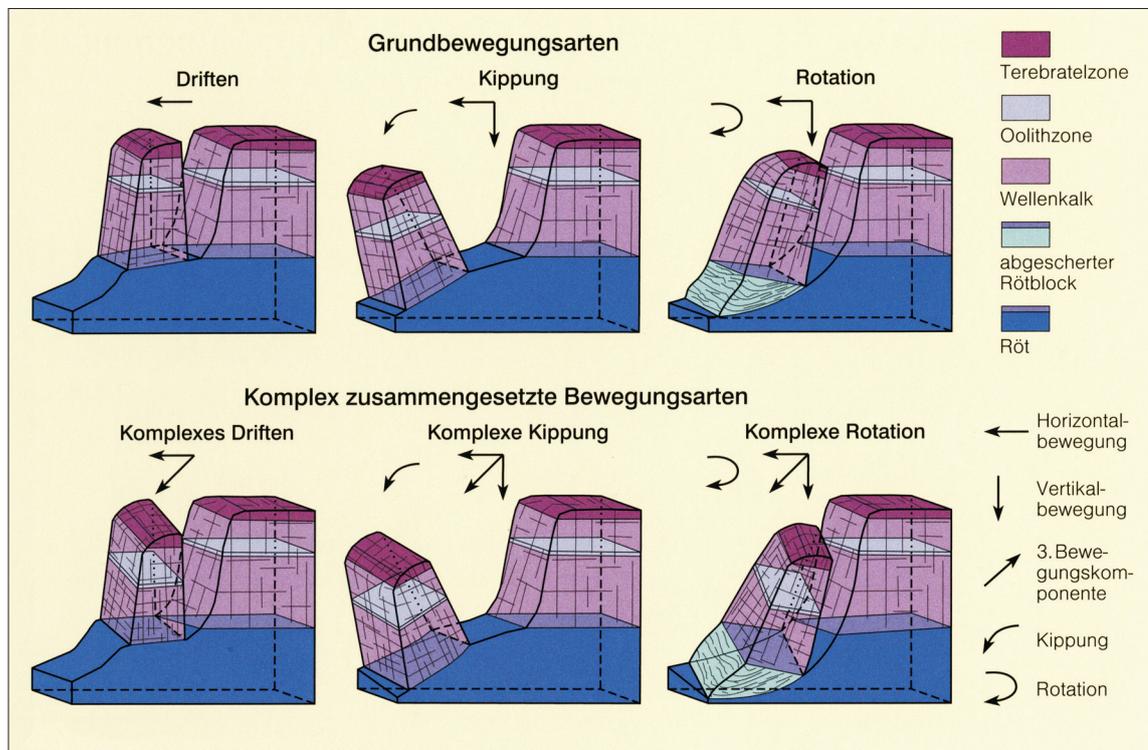


Abb. 3.1: Bewegungsarten einer Scholle an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken. (BEYER & SCHMIDT 2003; verändert).

Aus den oben beschriebenen Bewegungsmechanismen resultiert ein typischer geomorphologischer Formenschatz. Der in Abbildung 3.2 dargestellte Hauptformenschatz an der Wellenkalk-Schichtstufe wurde bereits u.a. von KIRBIS (1950), ACKERMANN (1959) und JOHNSEN & KLENGEL (1973) beschrieben. Auf die Formen soll im Einzelnen nur ganz kurz eingegangen werden, für weitergehende Betrachtungen sei auf die oben genannte und folgende Literatur verwiesen: BEYER (1999), BEYER 2002b, BEYER & SCHMIDT (2002) SCHMIDT & BEYER (2001, 2002).

Für diese Arbeit sind vor allem die Bereiche des Stufenrandes mit initialen Formen, den Zerr- oder Abrißspalten interessant. Diese 5 bis 20 m langen (in Ausnahmefällen auch Längen von über 100 m) werden oftmals von Baumwurzeln überspannt. Die Spalten verlaufen subparallel bis spitzwinklig zur Trauf (vgl. Kap. 4.2). Nach BEYER (2002b) entstehen diese ausgedehnten Hohlformen durch initiale translative Driftbewegungen. Schreiten diese Bewegungen fort, dann kommt es zur Bildung der seltener auftretenden Treppenstufen mit Vertikalversätzen im Dezimeterbereich. Ist die Ausdehnung der entstehenden Flachform ausgeprägter und hat der Verlagerungskörper ein deutlich größeres Volumen mit größeren vertikalen Höhenunterschieden, spricht man von einer Absatzscholle. Nehmen die Verlagerungsbeträge zu können bis zu 15 m tiefe Schluchten zwischen Abrisswand und Blockschollen entstehen. Auf Grund ihrer Geomorphologie werden sie auch als Mauerschollen bezeichnet (KIRBIS 1950). Gleiten diese Schollen weiter ins Tal führt dies zu einer

weniger schroffen Morphologie aufgrund von Überformung durch Erosion und Verwitterung. In Abbildung 3.2 sind beispielhaft Wallschollen mit Gräben und Rückenschollen mit hangwärtigen Mulden dargestellt (vgl. BEYER 2002b, KIRBIS 1950). ACKERMANN (1958) beschreibt die am weitesten von der Trauf entfernten Massenverlagerungskörper und bezeichnet sie als Fußschollen. Sturzfließungen gehören zu den spektakulärsten und gefährlichsten Massenverlagerungen. Als auslösendes Moment werden immer wieder extreme meteorologische Ereignisse beschrieben. Als potentielle Ausgangsformen für spektakuläre Felsstürze und Sturzfließungen werden vor allem Massenverlagerungsgebiete mit Mauerschollen (Abb. 3.2) angesehen (vgl. ACKERMANN 1958, BEYER 2002b, JOHNSEN & KLENGEL 1973, SCHMIDT 1988b, SCHMIDT & BEYER 2002).

Die Bestimmung des Alters von Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe, speziell der einzelnen Formen ist trotz zahlreicher Untersuchungen immer noch schwierig. Geomorphologische Befunde in Kombination mit dendrogeomorphologischen und pollenstratigraphischen Untersuchungen (vgl., BAUM & SCHMIDT 2001, GÄRTNER 2003, SAHLING 2003) ermöglichen jedoch allgemein gültige Aussagen.

Nach ACKERMANN (1959, 1977) können Zerrspalten und Mauerschollen als rezent bis subrezent

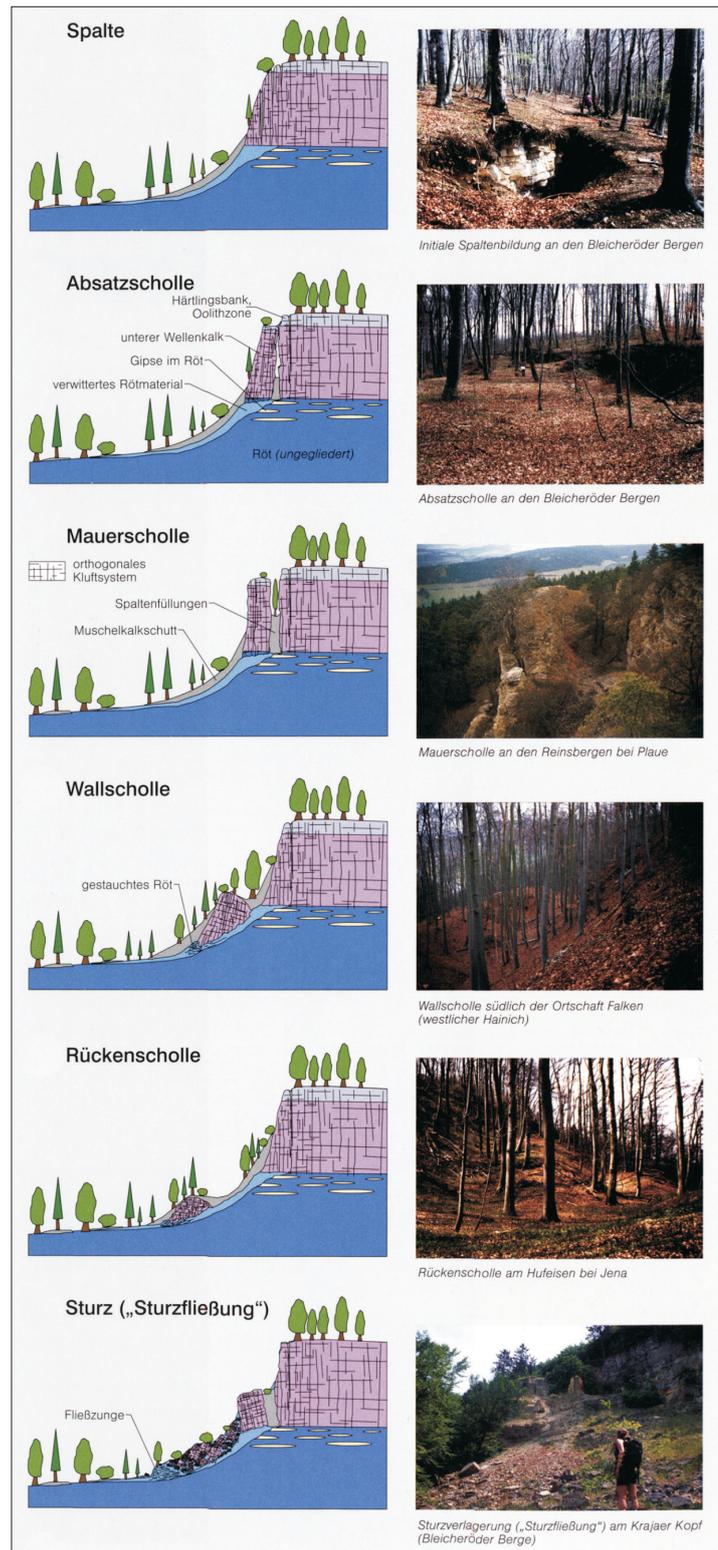


Abb. 3.2: Hauptformenschatz der Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken (BEYER & SCHMIDT 2003; verändert).

(Alter  $\leq$  200 Jahre) bezeichnet werden. Aktuelle Untersuchungen zeigen rezente Bewegungen von Mauerschollen und Spalten an (vgl. JOHNSEN 1981, JOHNSEN & SCHMIDT 2001, SAHLING 2003). Untersuchungen von JOHNSEN & SCHMIDT (2000) ergaben für den Zeitraum 1973 bis 1997 durchschnittliche Bewegungsgeschwindigkeiten von 3,3 mm/a. Die Messungen erfolgten mit einem Stahlmaßband zwischen Abrisswand und Mauerscholle. Andere Untersuchungen ergaben einen weit aus höheren Wert. Ermittelt wurden 28 mm/a (Zeitraum 1953-2000) an einer initialen Spaltenöffnung durch dendrogeomorphologische Analyse (vgl. GÄRTNER 2003, SAHLING 2003)

Das Alter der Sturzfließungen reicht von rezent bis in die historische Zeit (bis 15. Jh) zurück und ist durch zahlreiche Archivdaten teilweise taggenau nachvollziehbar (BAUM & SCHMIDT 2001).

Problematischer ist die Alterseinordnung von Absatz-, Wall- und Rückenschollen, sowie von Schutt verhüllten Depressionen. Nach ACKERMANN (1959, 1977) sind Absatz- und Rückenschollen aber auch durch Schutt verfüllte Hohlformen, die morphologisch als Depression in Erscheinung treten, in das Frühe Holozän einzuordnen. Allerdings zeigen pollenanalytische Untersuchungen an Rückenschollen von BAUM & SCHMIDT (2001), dass diese Formen ein Mindestalter jünger als Subboreal (ab 2500 v. Chr.) aufweisen. Jedoch gehen sie davon aus, dass die eigentliche Verlagerung viel früher erfolgte. Wallschollen ordnet ACKERMANN (1959) in die jüngere historische Zeit ein (1550-1850 n. Chr.). Dieser Zeitraum entspricht annähernd der kleinen Eiszeit und wird von BERRISFORD & MATTHEWS (1997) als eine Phase erhöhter Massenverlagerungsaktivität in Nordeuropa angesehen. Somit liegt das Alter der Wallschollen bei 150 bis 450 Jahren. Die nachweislich ältesten Massenverlagerungskörper sind die Fußschollen, deren Entstehungsalter im Pleistozän / Dryas einzuordnen ist (BEYER 2002b).

Vor allem die genannten jüngeren Massenverlagerungskörper (Mauerschollen, Absatz- und Wallschollen) sind teilweise rezent inaktiv, aber durch veränderte Umweltbedingungen sind Impulse möglich, die eine Reaktivierung der Bewegung zur Folge haben können (JOHNSEN 1974b, KRÜMMLING et al. 1975).

#### 4. Untersuchungsgebiete

Die in **Kapitel 1.1** beschriebenen Fragestellungen stellen bestimmte Anforderungen an die Untersuchungsgebiete. Für die Analyse sind Schichtstufenabschnitte von Bedeutung, die in ihrem morphologischen Aufbau initiale Spaltenbildungen aufweisen (**Kapitel 2.6**). Nur in diesen rezenten Formen finden sich natürlich freigelegte und physiologisch aktive Wurzeln, die bezüglich der Fragestellung von Bedeutung sind. Weiter müssen die Standorte einen einheitlichen Baumbestand aufweisen. In diesem Raum ist die Buche (*Fagus sylvatica* L.) dominierend und wurde folglich für die Untersuchung ausgewählt. An dieser Stelle sei auf **Kapitel 4.3** (Klima, Böden und Vegetation) und **Kapitel 4.4** (Allgemeine Daten zu *Fagus sylvatica* L.) näher hingewiesen. In **Kapitel 4.3** wird

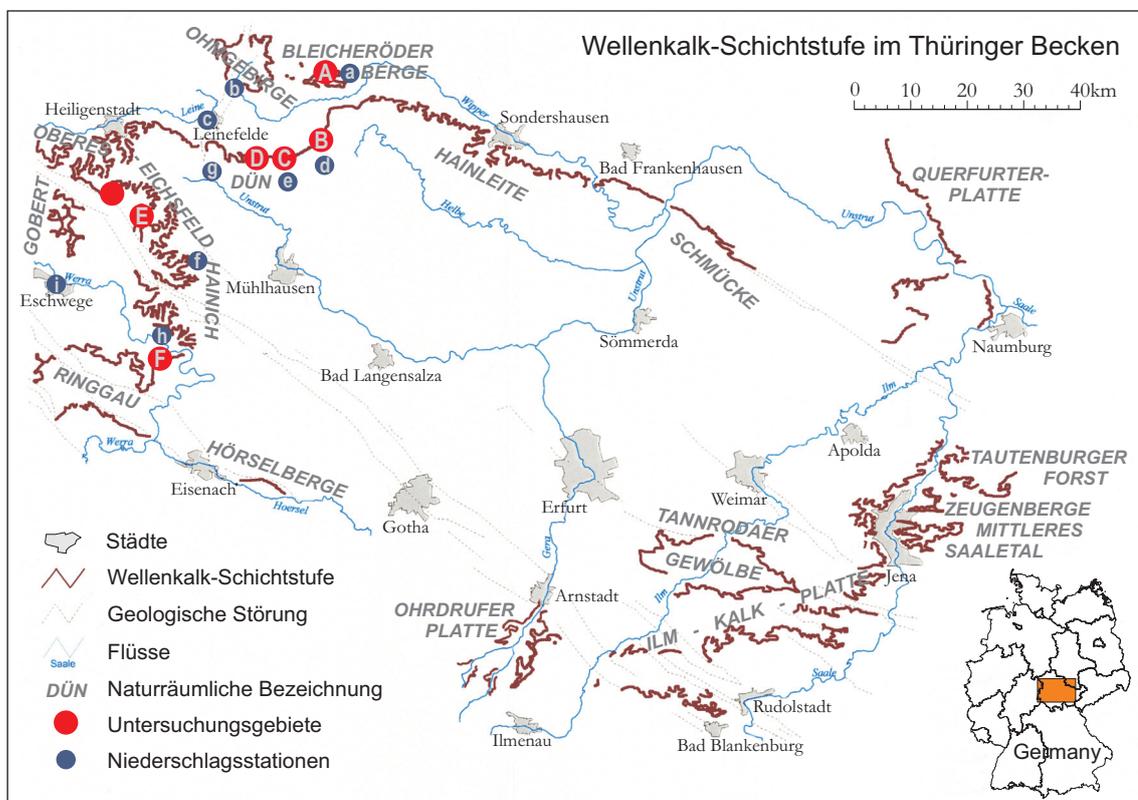


Abb. 4.1: Die Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken (BEYER 2002b; verändert). Die einzelnen Buchstaben der Untersuchungsgebiete entsprechen den geomorphologischen Detailkartierungen in Anlage 8: A - Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge); B - Vollenborn Ost/West (Dün); C- Ritterholz (Dün); D - Grenzholz (Dün); E - Junkerholz/Westerwald (Eichsfeld); F - Appental/Trefffurter Stadtwald (Ringau). Die Messwerte der einzelnen Niederschlagsstationen sind in Anlage 5 aufgeführt: a - Bleicherode; b - Worbis; c - Leinefelde; d - Keula; e - Hüpstedt; f - Eigenrieden; g -Dingelstädt; h - Treffurt; i - Eschwege.

sowohl auf das Klima, die Ausprägung der Böden und die Vegetation in den Untersuchungsgebieten eingegangen, dem schließt sich ein allgemeiner Überblick über Verbreitung, Standort und Wuchs von *Fagus sylvatica* L. in **Kapitel 4.4** an.

Die Grundlage dieser Arbeit bildet das Massenverlagerungsgebiet in den Bleicheröder Bergen (Krajaer Kopf), da hier ein Testfeld mit künstlich freigelegten Wurzeln angelegt wurde (**Kapitel 5.1**)

Die Lage der einzelnen Untersuchungsgebiete ist im folgenden Kapitel dargestellt. Geologische und geomorphologische Aspekte werden in **Kapitel 4.2** näher betrachtet.

#### 4.1 Lage der Untersuchungsgebiete

Zwischen Harz, Thüringer Wald und Thüringer Schiefergebirge reicht ein Ausläufer der Trias-Zechstein-Gesteinsfolge vom Hessischen Bergland etwa 150 km nach Südosten. Dieser Naturraum wird Thüringer Becken genannt (LIEDTKE 1995) (vgl. **Kap.4.2**).

Entsprechend der muldenförmig strukturellen Lagerungsverhältnisse der triassischen Schichten, sind die Ausstrichbereiche der Wellenkalk-Schichtstufe vorgegeben. So entwickelte sich in den Randbereichen des Thüringer Beckens durch strukturbedingte Steil- und Flachformen eine markante Schichtstufenlandschaft (SEIDEL 2003).

Alle Untersuchungsgebiete befinden sich im Nordwesten bzw. Westen des Thüringer Beckens im Bereich der Wellenkalk-Schichtstufe (Abbildung 4.1). Detaillierte geomorphologische Aufnahmen zu den ausgewählten Gebieten finden sich in der **Anlage 6**.

#### 4.2 Geologische und morphologische Aspekte der Wellenkalk-Schichtstufe

Geologisch gehört das Thüringer Becken zum mesozoischen Tafelgebirgsstockwerk (WALTER 1995). Am Aufbau sind vor allem die triassischen Sedimente Buntsandstein, Muschelkalk, Keuper und die Gesteine des Zechsteins beteiligt. Im Nordosten wird es durch den Ausstrich des Zechsteins am Harz sowie Kyffhäuser und der Finnestörung im weitesten Sinne und im Südosten von dem Zechsteinausstrich am Thüringer Schiefergebirge begrenzt. Im Südwesten markiert die Nordost-Randstörung des Thüringer Waldes und im Nordwesten die Ohmgebirgsgrabenzone die Grenzen der Ausdehnung des Beckens (SEIDEL 2003).

Die paläogeographische Entwicklung des Thüringer Beckens begann mit der Zechsteintransgression in das Senkungsgebiet des Germanischen Beckens (DOCKTER & STEINMÜLLER 1993). Aufgrund des Baustils der tektonischen Formen rechnet LOTZE (1938) Thüringen zu Südsaxanien. Der heutige strukturelle Bau des Thüringer Beckens wurde durch die saxonische Tektonik im Rahmen der alpidischen Gebirgsbildung bestimmt. Folglich dominieren herzynische (NW-SE) bis rheinische (NNE-SSW) Störungszonen sowie flachwellige Sättel und Mulden (vgl. Abb. 3.2) (SEIDEL 2003).

Aus der Abbildung 4.2 wird deutlich, dass in den Untersuchungsgebieten vor allem die triassischen Einheiten Buntsandstein und Muschelkalk aufgeschlossen sind. Für die Ausprägung der Schichtstufenlandschaften im Thüringer Becken sind vor allem der Obere Buntsandstein (Röt) und der Untere Muschelkalk (Wellenkalk) verantwortlich (SCHMIDT & BEYER 2001).

Der stratigraphische Aufbau des Oberen Buntsandstein (Röt) gliedert sich wie folgt: Unterer- (Salinarröt), Mittlerer- (Pelitröt) und Oberer Röt (Myophorienfolge). Den Übergang von der Solling-

Folge (Mittlerer Buntsandstein) zu der Salinarröt-Folge bildet eine tonig-sandige, feinschichtige Wechsellagerung, der Thüringische Chirotheriensandstein (SEIDEL 2003).

Die vollständige Ausbildung der Sallinarröt-Folge mit zwei Steinsalzhorizonten und zugehörigen Anhydrit-Gliedern findet man vor allem in der Thüringischen Senke (SEIDEL 2003). Das Äquivalent der hochsalinaren Entwicklung befindet sich an den Randbereichen des Beckens in Form einer Wechsellagerung von Gips bzw. Anhydrit und Mergel (SEIDEL 2003).

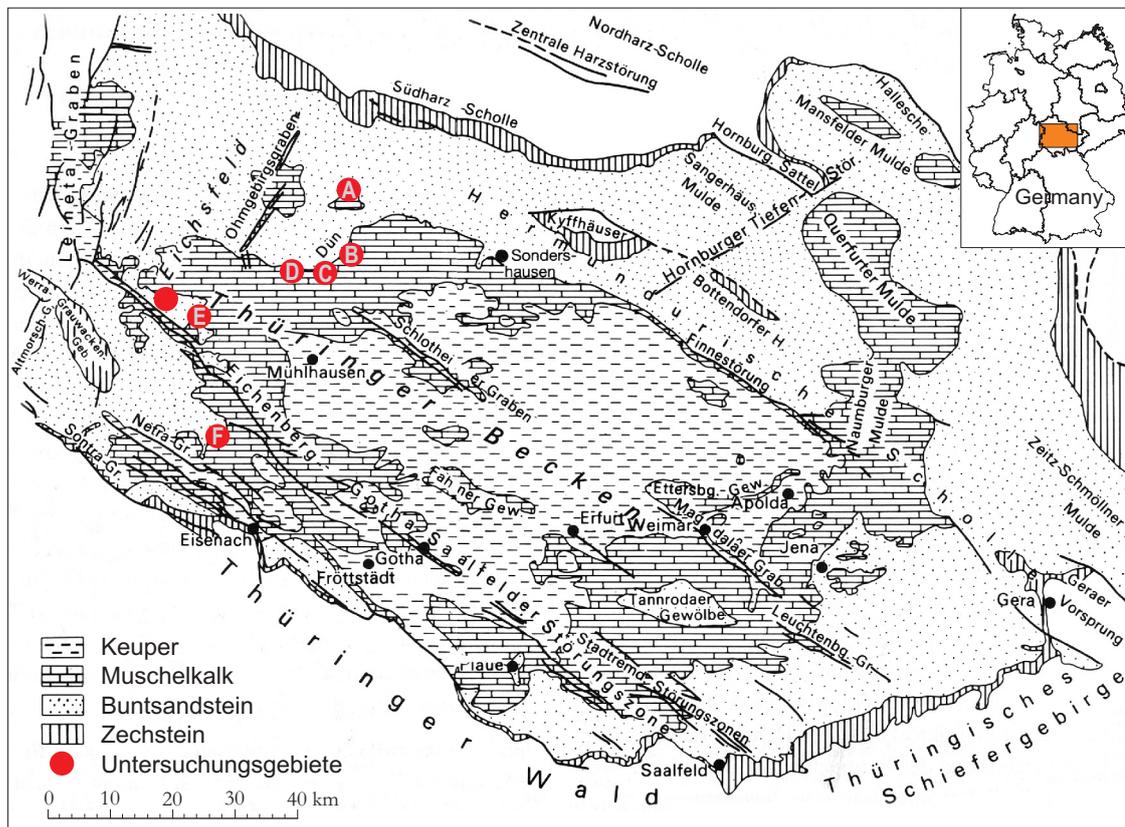


Abb. 4.2: Geologische Übersichtskarte des Thüringer Beckens ohne quartäre Bildungen (PATZELT 1994: 6; verändert).

Die Pelitröt-Folge gliedert sich in die Unteren Bunten Schichten, den Roten Rötmergel und die Oberen Bunten Schichten. Die unterste Schicht erhielt ihren Namen nach der Farbe der Tonmergelsteine, die von rotbraun über violett bis graugrün reicht. In die Serie der Tonmergelgesteine sind Dolomite, Feinsandsteine und untergeordnete Gipse eingeschaltet (SEIDEL 2003). Rotbraune Ton-Schluff-Mergelgesteine mit einzelnen Gips-Horizonten und eingeschaltetem „Doppelquarzit“ charakterisieren die Serie der Roten Rötmergel. Die Oberen Bunten Schichten bestehen aus roten und grauen Schluff- und Tonmergelsteinen mit einzelnen dolomitischen Bänken (WEBER 1955). Abgeschlossen wird der Obere Buntsandstein (Röt) durch die Myophorien-Folge. Sie setzt in Teilen des Thüringer Beckens mit zwei konglomeratischen Glaukonitbänken ein. Es folgen plattige, dichte Kalksteine mit eingeschalteten grau-grünen Mergellagen und die oberste tonige Bildung des Buntsandsteins, die Myophorientone. Namensgebend für die Myophorien-Folge ist die Muschel „Myophoria vulgaris“, sie bezeugt ein marines muschelkalkähnliches Milieu im Oberen Röt (SEIDEL 2003). Allgemein kann man festhalten, dass der Mittlere und Obere Röt relativ fossilreich sind,

hingegen der Untere Röt entsprechend der erhöhten Salinität weniger bis keine Fossilien aufweist (SEIDEL 2003).

Aufgrund des Tonreichtums tendieren die Rötschichten bei Wasserzufuhr zur Plastifizierung und bei Trockenheit zur Ausbildung von Trockenrissen. Diese Kombination aus Quellfähigkeit, Plastifizierung und tief reichenden Trockenrissen fördert die Reduzierung der Scherfestigkeit innerhalb des Hanges (TILCH 1999). Durch seine tonig-mergelige Ausstattung wirkt der Röt wasserstauend (SEIDEL 2003).

Den Unteren Muschelkalk bezeichnet man aufgrund seiner unregelmäßigen Schichtgrenzoberflächen auch als Wellenkalk. Als erster verwendete Glenk (1779-1845) diesen Begriff zur Charakterisierung des Unteren Muschelkalks (RÜGER 1937: 137).

Tab. 4.1: Stratigraphie des Oberen Buntsandsteins (Röt) und des Unteren Muschelkalk (Wellenkalk). Mächtigkeit A - Oberes Eichsfeld / Hainich; Mächtigkeit B – Hainleite / Dün; Mächtigkeit C - Thüring. Senke (zusammengestellt nach: DOCKTER 1966; SEIDEL 2003; ZIEGENHARDT 1968; ZIEGENHARDT & JUNGWIRTH 1971).

Stufen	Schichtglieder	Mächtigkeit A in (m)	Mächtigkeit B in (m)	Mächtigkeit C in (m)
Unterer Muschelkalk (mu)	Schaumkalkzone(`k)	5	9-10	5-12
	Oberer Wellenkalk (mu3)	19	16-19	10-21
	Terebratelzone (`T)	8	6-8	3-8
	Mittlerer Wellenkalk (mu2)	28	18-20	22-32
	Oolithzone (òO)	7	7-9	5-11
	Unterer Wellenkalk (mu1)	36	37-40	32-40
		<b>Σ 103</b>	<b>Σ 93-106</b>	<b>Σ 77-125</b>
Oberer Buntsandstein (so)	Myophorien-Folge (so3)	7	10	14-18
	Pelitröt-Folge (so2)	78	85	85
	Salinarröt-Folge (so1)	32	35	46-89
		<b>Σ 117</b>	<b>Σ 130</b>	<b>Σ 145-192</b>

Der Wellenkalk ist ein marines bis organogenes Flachwassersediment. Er besteht aus ebenschichtig-plattigen, flasrigen, flachwelligen, knaurig-intraklastischen, grau gefärbten mergeligen Kalksteinen bzw. Schiefen. Dabei treffen die genannten Texturen für den Unteren, Mittleren und Oberen Wellenkalk gleichermaßen zu (SEIDEL 2003). In seiner Gesamtheit ist der Wellenkalk im Untersuchungsraum zwischen 90 und 110 m mächtig (Tabelle 4.1).

Die einzelnen Hauptglieder des Wellenkalks werden durch drei Härtlingszonen unterteilt. Seine Gesamtzusammensetzung sieht wie folgt aus:

Unterer Wellenkalk, Oolithzone, Mittlerer Wellenkalk, Terebratelzone, Oberer Wellenkalk und

Schaumkalkzone. Die Oberkante der Schaumkalkzone bildet die Grenze zwischen Unterem und Mittlerem Muschelkalk (Tab. 4.1).

Der Untere Wellenkalk beginnt über den Myophorienschichten des Oberen Buntsandsteins mit der Gelben Grenzbank. Diese Salinar-Dolomit-Bank hat einen hohen Anteil an äolischem Quarz- und Glimmerschluff (SEIDEL 2003). Es folgt der unterste graue Mergel-Kalkstein mit seiner oben beschriebenen Ausbildung.

Die abschließende Oolithzone wird durch Mergelzwischenhorizonte in eine Obere und Untere Oolithbank getrennt. Die kristallinen Kalkbänke sind relativ kompakt, flachwellig, ebenschichtig und haben z.T. eine oolithische Struktur (SEIDEL 2003).

Der Mittlere Wellenkalk zeigt einen ähnlichen Aufbau wie der Untere Wellenkalk. Die Gesteine der Terebratelzone führen oft organogene Trümmerreste (Schill). Typisch für die Obere und Untere Terebratelbank sind Lagen von *Coenothyris vulgaris* und Trochitenreste (SEIDEL 2003).

Über dem Oberen Wellenkalk folgt die Zone der Schaumkalkbänke. Sie bestehen aus feinstschaumigen-rundporigen, sehr hellfarbigen Kalken oder Muschelschalenbreccien, die teilweise in Calcit umgewandelt sind (Abbildung 4.3).

Der Wellenkalk ist im Vergleich zu den eingeschalteten Oolith-, Terebratel- und Schaumkalkzonen deutlich verwitterungsanfälliger. Dies führt zu einer markanten Untergliederung des Stufenhanges durch die drei Härtlingszonen (BEYER 2002). Innerhalb des Stufenhanges bzw. des Gesteins führt ein engständiges, orthogonales Kluftsystem zu einer begünstigten vertikalen Was-

serbewegung bis in die liegenden, wasserstauenden, plastifizierbaren und subrosions-anfälligen Rötschichten (JOHNSEN & KLENGEL 1973).

Die differenzierten Eigenschaften im Bezug auf die Wasserwegsamkeit, die unterschiedliche Beschaffenheit der Gesteine und die daraus resultierende Untergliederung des Stufenhanges haben eine markante Strukturformenlandschaft zur Folge. Die Voraussetzung für diesen Relieftypus der Schichtstufenlandschaft sind flachlagernde, geringfügig einfallende, nicht gefaltete Gesteinspakete, die aus Wechsellagen morphologisch weicher und morphologisch harter Gesteine bestehen (SEMMELE 1991). Das Verwitterungsverhalten der Gesteine ist maßgeblich von den klimatischen

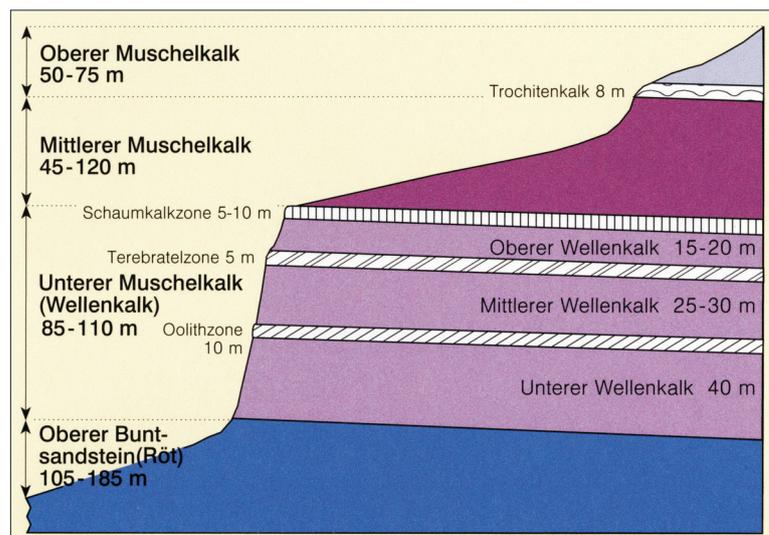


Abb. 4.3: Der stratigraphische Aufbau der Muschelkalk-Schichtstufe (BEYER & SCHMIDT 2003; verändert).

Verhältnissen abhängig. In den gemäßigt humiden Klimaten spielt vor allem die Einflussgröße Wasser eine entscheidende Rolle bei der Abtragung und Formung der Schichtstufe (SCHUNKE & SPÖNEMANN 1972).

Die geomorphologische Charakterisierung der Schichtstufe erfolgt im Wesentlichen durch die Reliefelemente Stufenfläche, Stufenhang und Fußfläche (vgl. BLUME 1987; SCHUNKE & SPÖNEMANN 1972; SCHMIDT 1988a). Abbildung 4.4 zeigt die Anordnung und Abgrenzung der verschiedenen Reliefelemente.

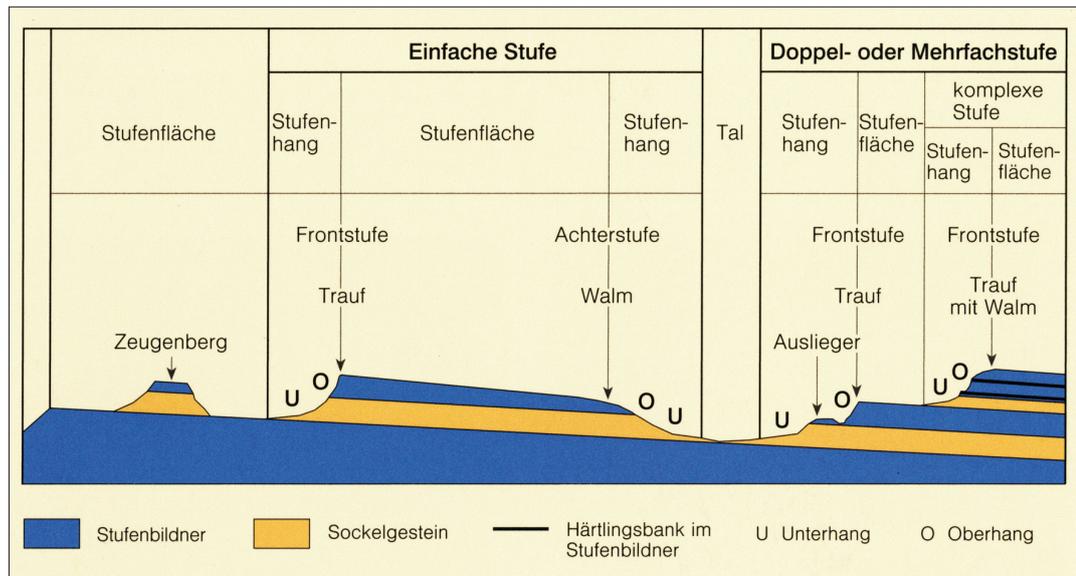


Abb. 4.4: Reliefelemente einer Schichtstufenlandschaft (BEYER & SCHMIDT 2003; verändert).

Die Stufenfläche ist eine mehr oder weniger weit ausgedehnte, ebene bis leicht gewellte Hochfläche mit geringer Reliefenergie. Diese orographisch höchsten Bereiche der Wellenkalk-Schichtstufe sind die bedeutendsten Flächen des Niederschlagseintrages. Dies ist ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf die hydrologisch gesteuerte Prozessmorphodynamik des Stufenhangsystems (BEYER 2002b). Die Stufenflächen sind meist in den traufbildenden Härtingszonen, den Oolith-, Terebratel- oder Schaumkalkzonen entwickelt. Ist ein Stufenhang im Trochitenkalk ausgebildet, so spricht man auch von einer Doppel- bzw. Mehrfachstufe an der Muschelkalk-Schichtstufe (vgl. Abb. 4.3 & 4.4).

Von der flach geneigten Stufenfläche leitet eine markante Linie über in den steiler geneigten Stufenhang. Je nach Ausprägung wird diese Linie als Trauf bzw. Trauf mit Walm bezeichnet. Bei Traufstufenhängen verschneiden sich die Stufenfläche und der Stufenhang in dem orometrisch höchsten Punkt (First) der Schichtstufe. Beim Stufenhangtypus Trauf mit Walm, folgt vom First ausgehend eine flache konvexe Wölbung ( $< 18^\circ$ ) die in einer deutlichen Kante (Trauf) endet (SCHUNKE & SPÖNEMANN 1972). Walmstufenhänge weisen mit mäßig konvexen Oberhängen ( $< 18^\circ - 20^\circ$ ) keinen markanten Übergang auf (BEYER & SCHMIDT 1999).

Morphologisch betrachtet ist der Stufenhang deutlich zweigliedrig. Der obere Hangabschnitt besteht aus morphologisch hartem Gestein, dem Stufenbildner und befindet sich im stratigraphischen Niveau des unteren Muschelkalkes (Wellenkalk). Der Unterhang befindet sich im stratigraphischen Niveau des morphologisch weichen Gesteins (Röt) und zeigt mit allmählich abnehmender Hangneigung das typische Relief eines Sockelgesteins (vgl. SCHUNKE 1968).

Der mehr oder weniger markante Übergang vom unteren Stufenhang zur Fußfläche wird auch als Hangfußzone charakterisiert (SCHUNKE & SPÖNEMANN 1972). Die Grenze zwischen Stufenhang und Fußfläche wird nach SCHUNKE (1968, 1969) am 4° Böschungswinkel festgelegt. Die Fußfläche ist meist im Röt, teilweise aber auch im Mittleren Buntsandstein ausgebildet und wird durch zunehmende Linearerosion stärker zertalt. Forciert wird diese unruhige Morphologie durch das Auftreten von Erdfällen als Folge von Rötgipssubrosion im Untergrund (BEYER 2002b).

Anhand der Neigungsrichtung des großräumigen Schichteinfallens können innerhalb der Schichtstufenlandschaft, Front-, Achter- und Diagonalstufenhänge unterschieden werden. Auf der Grundlage des flachen Schichteinfallens zum Zentrum des Thüringer Beckens hin, ist die Neigung der Schichten bei Frontstufen hangeinwärts gerichtet. Hangauswärts gerichtetes Schichteinfallen ist bei Achterstufen zu finden (SCHMIDT 1988a). Stufenabschnitte deren Schichten senkrecht zur Stufenhangfläche weder aus dem Hang noch in den Hang fallen, werden nach BLUME (1987) als Diagonalstufen bezeichnet.

### 4.3 Klima, Vegetation und Böden

Durch die Lage in Mitteleuropa nimmt das Thüringer Becken in großklimatischer Hinsicht eine Mittelstellung zwischen den ozeanisch beeinflussten Gebieten im Westen und den kontinentalen Bereichen im Osten Europas ein. Die Untersuchungsgebiete liegen nach HENDL (2002) im Klimagebiet der deutschen Mittelgebirgsschwelle, genauer im Bereich des Mitteldeutschen Berg- und Hügellandklimas.

Im Thüringer Becken zeigt sich eine deutliche Abnahme des ozeanischen Einflusses mit zunehmender Entfernung von West nach Ost. In diesem Naturraum wird der geografische Formenwandel durch die Veränderung der thermischen und hygrischen Verhältnisse sowie durch ausgeprägte Luv-Lee-Effekte bestimmt (vgl. METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR 1953). Ausschlaggebend für die klimatischen Verhältnisse des Großraums ist der Einfluss des Reliefs. Die Schichtstufenlandschaften empfangen auf Grund ihrer größeren Höhen und eines Staueffektes höhere Niederschläge als das Keuperbecken (HENDL 2002). Vergleicht man in Abbildung 4.5 die höheren Bereiche der Schichtstufenlandschaft, Oberes Eichsfeld, Hainich, Ringau, aber auch den Dün und die Bleicheröder Berge mit den tieferen, zentralen Bereichen des Thüringer Beckens, so zeigen sich deutlich Luv-Lee-Effekte. Vor allem die vorherrschenden atlantisch getönten Westwinde sorgen an den Stufenhängen im Westen für einen erhöhten

Jahresniederschlag (> 750 mm). Im tiefer liegenden Zentrum des Beckens liegen die mittleren Jahresniederschläge unter 500 mm (Station Straußfurt: 475 mm).

Die kontinentaler geprägten, östlicher gelegenen Schichtstufenabschnitte (Hainleite, Schmücke, Ilm-Kalk-Platte) verzeichnen jedoch mehr Niederschläge. Hier kommt der markante Anstieg der Wellenkalk-Schichtstufe (400-500 m NN) zum tragen, so dass durchschnittlich 50-200 mm (vgl. Abb. 4.5) mehr Niederschlag fällt als in den tiefer gelegenen Vorländern (BEYER 2002b).

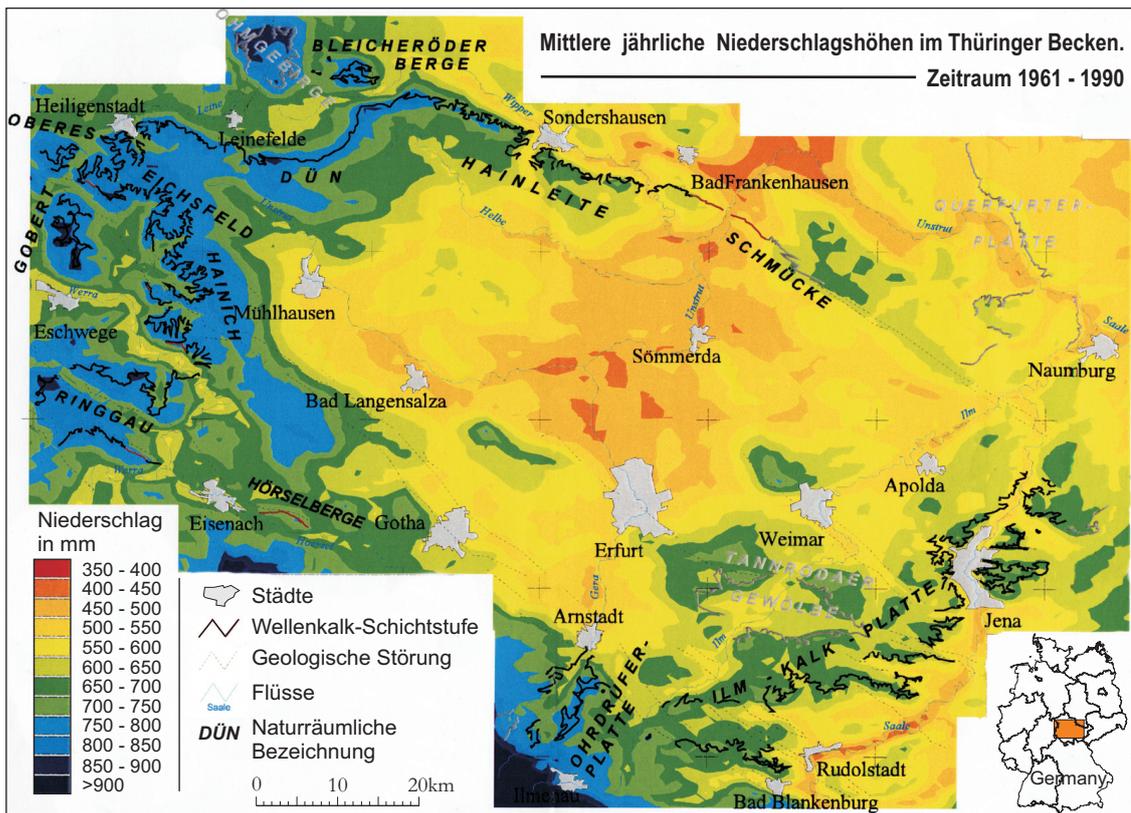


Abb. 4.5: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen im Thüringer Becken. Zeitraum 1961 bis 1990 (Niederschlagsdaten DWD Offenbach; Grundlage: Modell Regime mit 4700 Stationen. BEYER 2002b: verändert).

Die Untersuchungsgebiete gehören nach ELLENBERG (1996) zum Vegetationsgebiet der kollinen-submontanen Buchenwälder mit Eichen. Auf Grund von Forst- und Ackernutzung ist die potentielle natürliche Vegetation auf kleinräumige Areale zurückgedrängt worden. Auf den Stufenflächen ist die natürliche Vegetation der Eichen-Hainbuchenwälder mit Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.) durch forstlichen Eingriff in reine Buchenwälder umgewandelt worden.

Teilweise finden sich noch Buchenmischwälder auf bodensauerer Standorten mit Anteilen von Traubeneiche (*Quercus petraea*), im Verzahnungsbereich zu Schluchtwäldern mit Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) sowie auf kalkreichen Standorten mit Eibe (*Taxus baccata*) und Elsbeere (*Sorbus torminalis*) (SDW-Schutzgemeinschaft Deutscher Wald 2006).

Viele Bodenpflanzen müssen den Zeitraum vor der vollen Blattentfaltung der Buchen (März – April) nutzen, denn nur im Frühjahr dringt genügend Licht bis zum Waldboden.

Neben den Rasengesellschaften dominieren im Frühjahrsaspekt Kalkzeiger wie Kuhschelle

(*Primula veris*) Leberblümchen (*Hepatica nobilis*) und Stengellose Kratzdistel (*Cirsium acaule*). Kiefern (*Pinus sylvestris*) sind vor allem in unmittelbarer Nähe zur Trauf verbreitet. Dabei scheinen sie die dort herrschenden extremen Standortbedingungen (Trockenheit, Nährstoffarmut) gut zu ertragen. Dieser Baumart gelingt es, sich selbst in den über 30° steilen, kaum bodenbedeckten Stufenabschnitten zu behaupten. Nach KÖSTLER et al. (1968) macht sie das Wurzelsystem und ihre Anpassungsfähigkeit in Bezug auf die edaphischen Bedingungen zu einer idealen Baumart zur Stabilisierung des Hanges.

Die schon erwähnten Schluchtwälder nehmen eine botanische Sonderposition ein. Der Eschen-Ahorn-Schattenhangwald tritt unter anderem in den hangwärtigen Hohlformen der Massenverlagerungsgebiete auf (KLINK & SLOBODA 1995). Neben einer Vielzahl an Sträuchern z.B. Gemeine Hasel (*Corylus avellana*) und Schlehe (*Prunus spinosa*) treten zahlreiche Edellaubhölzer wie Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Esche (*Fraxinus excelsior*), Elsbeere (*Sorbus torminalis*), Sommerlinde (*Tilia platyphyllos*) aber auch Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) auf. Auf den Schuttflächen unterhalb des Oberhangs bzw. der Mauerschollen sind verschiedene Kalkschuttgesellschaften zu finden (vgl. HILBIG 1971). Auf dem Rötunterhang gehen die unterschiedlichen Sonderstandorte im Massenverlagerungsgebiet in Buchenwälder über. Die potentielle natürliche Vegetation der Rötfußfläche ist weitgehend der anthropogenen Nutzung gewichen.

Ebenso hat der anthropogene Einfluß eine Veränderung der Bodengesellschaften zur Folge. Allerdings wird die großräumige Anordnung der Böden in erster Linie von den geologischen Verhältnissen bestimmt. Modifizierend wirken sich Vegetation, Relief, Hangneigung, Abtragungs- bzw. Umlagerungsprozesse und hydrologische Verhältnisse aus (ZIEGENHARDT 1968). Die Bodendecke in den Untersuchungsgebieten ist überaus vielgestaltig.

In den hangproximalen Bereichen der Stufenflächen und des oberen Stufenhangs sind vorwiegend skelettreiche, karbonathaltige, tonige, relativ flachgründige Rendzinen zu finden. (vgl. SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002). Je nach morphologischen Gegebenheiten und der Beschaffenheit des Ausgangsgesteins (flaserig-plattige oder dickbankige, feste Kalksteine) wechseln die Mächtigkeit und der Skelettanteil der Muschelkalkböden sehr stark. In der Regel ist der Ah-Horizont nicht mächtiger als 25 bis 30 cm (ZIEGENHARDT 1968).

An den Steilstücken der oberen Stufenhänge, speziell in den Bereichen der Abrisswände und an den Flanken der Mauerschollen, geht die Bodenentwicklung nicht wesentlich über ein Initialstadium hinaus. Infolge des mangelnden Schutzes durch Vegetation kann hier die Erosion im starken Maße wirksam werden. Es überwiegen daher in diesem Areal Rohböden vom Typ Syrosem oder Locker-Syrosem (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002; ZIEGENHARDT 1968).

Der Rötsockel ist teilweise von Wellenkalkschutt bedeckt. Auf diesen Schuttdecken haben sich lockere Kalksteinschutt-Rendzinen entwickelt. Bei höherem Feinerdeanteil wird diese Bodenart als Schutt-Pararendzina bezeichnet. Im Gebiet des weniger vom Wellenkalkschutt beeinflussten Rötunterhangs sind schluff-tonreiche Mergelrendzinen oder Kalkpelosole ausgebildet (RAU et al. 1995). Entsprechend dem Ausgangsmaterial ist der Skelettanteil geringer. Durch den hohen

Tonanteil neigen solche Böden zur Staunässe und bei Trockenheit kommt es zur Bildung von Schrumpfrissen (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 2002).

Auf kieselsäurehaltigen Ausgangsgestein des Mittleren Buntsandsteins haben sich saure, sorptionsschwache und nährstoffarme podsolierte Böden gebildet. Es überwiegen Podsole bis Podsol-Braunerden. In Bereichen von mächtigen Tonlagen kann es durch den Stau von eindringendem Niederschlagswasser zu einer Pseudovergleyung des Unterbodens kommen (ZIEGENHARDT 1968).

#### 4.4 Allgemeine Daten zu *Fagus sylvatica* L.

Die Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) ist in ganz Mitteleuropa verbreitet (SDW-Schutzgemeinschaft Deutscher Wald). Das Verbreitungsgebiet reicht von Süd-Skandinavien bis Mittelitalien, in west-östlicher Richtung von der Atlantikküste Frankreichs bis zur Weichselniederung im Nordosten Polens (Abbildung 4.6). Im subkontinentalen Polen kommt sie nur noch in geschützten Mischwäldern vor (ELLENBERG 1996). Ihr Vorkommen wird in erster Linie von Niederschlag und Temperatur begrenzt. In kontinentalen Klimaten und in südlichen Gebieten wirkt der Sommerwassermangel begrenzend. In nördlichen Gebieten hemmen niedrige Wintertemperaturen und Spätfröste im Frühling die Ausbreitung. Sie ist an ozeanische bis subkontinentale Klimate gebunden. Ihr Gedeihen erfordert über 650 mm Jahresniederschlag und eine Jahresdurchschnittstemperatur über 8° Celsius (PETERS 1997).

Die besiedelten Bodenarten reichen von tonigem Lehm bis zu lehmigen Sand. Auf Pseudogley und unter reduzierten Bedingungen in der obersten Bodenschicht (bis 20 cm) findet man keine Rotbuchen. Gleiches gilt für stark versauerte Böden mit einem pH-Wert unter 3,5 und Böden mit alkalischer Bodenreaktion (pH-Wert > 7) (ELLENBERG 1996, PETERS 1997).



Abb. 4.6: Verbreitungskarte Rotbuche (SDW - Schutzgemeinschaft Deutscher Wald 2006).

Die Konkurrenzkraft von *Fagus sylvatica* L. führt bei mittleren Standortverhältnissen in der Regel zu einer Dominanz innerhalb des Bestandes. Auch das schnellere Jugendwachstum anderer Arten, wie beispielsweise des Bergahorns (*Acer pseudoplatanus* L.) oder der Gemeinen Esche (*Fraxinus excelsior* L.) kann dies nicht verhindern (ETTER 1949, RÖHRIG 1966); die Rotbuche ist, im Gegensatz zu den genannten Laubbäumen, eine in der Jugendphase sehr schattentolerante und im Alter

wuchskräftige und sehr stark schattenspendende Art (ELLENBERG 1996). Auf den für die Buche optimalen Standorten mittlerer Basen- und Wasserversorgung in der submontanen Stufe bilden sich dicht geschlossene Bestände in denen sich kaum eine andere Baumart dauerhaft etablieren kann. Die Buche verdrängt Konkurrenten aus deren eigenen ökologischen Optimalstandort auf weniger optimale Standorte. Erst in standörtlichen Randbereichen (Auen, Blockschutthängen u.a.) kommen die verdrängten Arten wieder zur Ausprägung (ELLENBERG 1996).

Tab. 4.2: Zusammenstellung physiologischer Angaben zu *Fagus sylvatica* L. (SDW 2006).

---

(Rot-)Buche	<i>Fagus sylvatica</i> L.
Baumhöhe	20-45 m
Baumalter	ca. 250 Jahre
Zahl der Blätter	ca. 200 000
Fläche der Blätter	1200 m <sup>2</sup>
Schirmfläche einer Altbuche	100 m <sup>2</sup>
Verdunstung von Wasser	bis 400 l/d in der Vegetationszeit
Bildung von Sauerstoff (O <sub>2</sub> )	5 kg/d
Verbrauch an Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	6 kg/d
Lufterneuerung	20 m <sup>3</sup> /d

---

Wuchshöhen von Buchen (*Fagus sylvatica* L.) liegen bei 20 bis 35 m, im Verband können auch Höhen von 45 m erreicht werden. Von der Gesamtwaldfläche in Deutschland (10,74 Mio. Hektar) nehmen Laubhölzer einen Anteil von 34% ein, im Gegensatz zu 66% der Nadelhölzer. Dabei hat die Buche einen Anteil an der Waldfläche von 14%. In Tabelle 4.2 sind die wichtigsten Eckdaten von *Fagus sylvatica* L. aufgeführt.

## 5. Methoden

Dendrogeomorphologische Untersuchungen kombinieren Methoden der Geomorphologie und der Dendrochronologie. Grundlage dafür bilden eine genaue Geländeauswahl und -anspruch, Bestimmung der vorherrschenden Prozesse und eine geomorphologische Kartierung der Standorte. Der dendrochronologische Ansatz beinhaltet die Baumauswahl, Probengewinnung und Präparation. Abhängig von der Morphologie des einzelnen Baumes erfolgt die Auswahl der zu beprobenden Stämme. Schwerpunkt dieser Arbeit ist jedoch die Analyse freigelegter Wurzeln. In Erweiterung der dendrochronologischen Arbeitsweise werden Teile von natürlich freigelegten Wurzeln entnommen, präpariert und ausgewertet.

Zur erstmaligen Bestimmung der Freilegungsreaktion von Laubholzwurzeln wurde ein Testfeld mit künstlich freigelegten Wurzeln angelegt (**Kapitel 5.1**).

Für spätere Auswertungen wurden geomorphologische Karten der entsprechenden Untersuchungsgebiete erstellt (**Kapitel 5.2**). Diese sind von besonderer Bedeutung, da sie einen Überblick über das heterogene Relief der entsprechenden Massenverlagerungsgebiete ermöglicht. Weiterhin macht sie eine Zuordnung und Einschätzung der Lage von initialen Spaltenbildungen an der Trauf der Wellenkalk-Schichtstufe möglich. Relevant für die Analyse von Strukturveränderungen im Wurzelholz sind aber auch die unmittelbaren Umgebungsinformationen der auszuwertenden Wurzeln. Alle angewendeten Methoden im Rahmen der Datenerhebung im Gelände (**Kapitel 5.3 u. 5.4**) und der Laborarbeiten (**Kapitel 5.5**) werden im Folgenden dargestellt.

### 5.1 Standortauswahl und Anlegen eines Testfeldes

Die Auswahl der Untersuchungsstandorte erfolgte zunächst anhand von Literaturrecherchen und der Auswertung von vorliegendem Datenmaterial (u.a. BAUM & SCHMIDT 2001; BEYER 2002b; SCHMIDT & BEYER 2002; JOHNSEN & SCHMIDT 2000). Nach eingehendem Studium des Datenmaterials und der Hinzuziehung von Karten und Luftbildern, konnten die vorläufigen Untersuchungsgebiete eingegrenzt werden. Durch anschließende Geländebegehungen wurden die endgültigen Standorte ermittelt.

Wichtige Kriterien für die Eignung als Untersuchungsgebiet waren sichtbare geomorphologische Prozesse in Form von initialen Spaltenbildungen mit betroffenen Wurzeln von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche), die einer rezenten Morphodynamik unterliegen. Dies schließt eine gewisse Nähe des Stammes zu den Spaltenrändern ein.

Folgende Untersuchungsgebiete wurden danach ausgewählt (vgl. Abb. 4.1):

- (A) Krajaer Kopf / Bleicheröder Berge / (SDB)
- (B) Vollenborn / Dün / (SDD05-07)
- (C) Ritterholz / Dün / (SDD01-03)
- (D) Grenzholz / Dün / (SDM)
- (E) Junkerholz / Eichsfeld / (SDE)
- (F) Appental, Trefffurter Stadtwald / Ringau (SDT)

Die Codierungen der einzelnen Untersuchungsgebiete werden in **Kapitel 5.4** (Abbildung 5.3) näher erläutert.

Auf der Grundlage der pflanzenphysiologischen Literatur (**vgl. Kap. 2.4**) kann davon ausgegangen werden, dass Wurzeln die Spalten durchziehen älter sind, als die jeweilige Hohlform. Somit ist es möglich, mit Hilfe der reinen Altersbestimmung eine Aussage über das relative maximale Alter der Spalte zu treffen (vgl. GÄRTNER 2003). Eine genaue Festlegung des Freilegungszeitpunktes der Wurzel ist erst durch eine holzanatomische Analyse von Strukturveränderungen in den Jahrringen der Wurzel möglich.

Zur Erstellung von Referenzchronologien wurden auf ausgewählten Flächen, innerhalb der Untersuchungsgebiete, entsprechende Bäume beprobt. Das Vorhandensein von repräsentativen Standortfaktoren für das jeweilige Untersuchungsgebiet (Klima, Relief, Exposition, Vegetation, Boden) und ein einheitlicher ungestörter Baumbestand gaben den Ausschlag für die Wahl der Referenzfläche. Für die Erstellung der Standortmittelkurve wurden Buchen der Klassen vorherrschend und herrschend ausgewählt. Dadurch sollte der Faktor Konkurrenz auf ein Minimum reduziert werden.

Die Referenzkurven dienen bei der Untersuchung von Zuwachskurven (Stamm) der einzelnen Probenbäume als Vergleich. So ist es möglich, geomorphologische Signale von klimatischen, bestandesdynamischen bzw. anderen Standortfaktoren zu unterscheiden (vgl. SCHWEINGRUBER 1996). Diese Referenzchronologien gewährleisten zudem eine exakte Datierung der Störungen des jeweiligen Standortes.

In den folgenden Kapiteln soll der Begriff „**Referenzbäume**“ für alle Bäume der Referenzfläche gelten und die Bezeichnung „**Probenbäume**“ für die von geomorphologischen Prozessen beeinflussten Bäume.

Um die bisher unbekanntten Veränderungen im Zellaufbau von Buchen- und Eschenwurzeln zu ermitteln, wurden am Standort Bleicheröder Berge/ Krajaer Kopf (vgl. Abb. 4.1) Testfelder angelegt. Zu diesem Zweck wurden Wurzeln von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche), *Fraxinus excelsior* (Gewöhnliche Esche) und für einen Vergleich der Freilegungsreaktion noch Wurzeln von *Pinus*

*sylvestris* (Waldkiefer) freigelegt (**vgl. Anlage 1, Probenübersicht**). Die Freilegung wurde zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt.

Im Testfeld 1 wurden die Wurzeln innerhalb der Vegetationszeit 2003 künstlich freigelegt, im Testfeld 2 vor der Vegetationsperiode 2004. Die Entnahme im Testfeld 1 erfolgte im Dezember 2004 und im Testfeld 2 im November 2005. Details der Probennahme bzw. Freilegung werden im **Kapitel 5.3** näher erläutert.

## 5.2 Geomorphologische Kartierung

Die Grundlage der Untersuchung bildet die Geländekartierung der Massenverlagerungsgebiete an der Wellenkalk-Schichtstufe. Auswertungen mit Hilfe von Luftbildern ist in diesem Naturraum nur schwer möglich, da ca. 92% der Stufenhänge eine geschlossene Waldbedeckung aufweisen (BEYER 2002). Somit ist eine geomorphologische Detailkartierung für die genaue Lagebestimmung der einzelnen zu untersuchenden Spalten von enormer Bedeutung. Aber auch die Einordnung der Einzelformen und der Überblick über die geomorphologischen Gegebenheiten hat für das Verständnis der jeweiligen Massenverlagerung einen hohen Stellenwert.

Die Kartiergrundlagen bildeten topographische Karten im Maßstab 1:10.000. Auf einen Maßstab von 1:2.500 vergrößert, dienten sie im Gelände zur Orientierung und zur Aufnahme der vorhandenen Formen. Die Legende von THERHORST (1996 unveröffentlicht, THERHORST & KIRSCHHAUSEN 2001, nach LESER & STÄBLEIN 1978), die speziell für Massenverlagerungen und Hangformen im Süddeutschen Schichtstufenland ausgearbeitet wurde, bildete die Grundlage für die Kartendarstellung. Auf Grund von lokalen Gegebenheiten (Formeninventar) wurde sie in Teilen modifiziert. Die Kartierung erfolgte nach der Querprofilmethode von DEMEK (1976). Dabei wurde der Stufenhang in seinen Teilbereichen mehrmals traversiert, um einen Einblick in die teilweise chaotische Lagerung der Schollen zu erhalten. Nur so war es möglich, die Formen in ihrer Ausbreitung und Lage zueinander zu erfassen. Die verwendete Symbolik ist den Legenden der beigefügten Karten zu entnehmen (**vgl. Anlage 6, Karten 1 bis 7, Geomorphologische Detailkartierung**). Die Kartierung erfolgte mit Hilfe folgender Messinstrumente: Höhenmesser (Messbereich bis 6.000 m NN), optisches Klinometer, Lemgeo 300 Lasertachymeter, Geologenkompaß, 2 m Messstab und Kompaß.

Um die Standortsituation der Bäume und Wurzeln nachzuvollziehen ist eine genaue Dokumentation (Skizze und digitale Fotos) des Umfeldes erforderlich. Diese umfasst neben Informationen über die Lage der Spalten, Hangneigungen und Distanzen auch eine genaue Lageskizze der Wurzeln, Tiefen der entnommenen Wurzelteile (gemessen von der Oberseite der Wurzel bis zur Bodenoberfläche) und die entsprechenden Längen bzw. Umfänge der freigelegten und nicht freigelegten Abschnitte. Gesammelt und zusammengestellt werden diese Daten in eigens entworfenen Geländeaufnahmebögen (**vgl. Anlage 3, Aufnahmebögen**).

### 5.3 Datenmaterial und Probennahme

Für die Untersuchung der Arten *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche), *Pinus sylvestris* (Waldkiefer) und *Fraxinus excelsior* (Gewöhnliche Esche) wurden im Rahmen dieser Arbeit von **47 Bäumen** insgesamt **344 Wurzelscheiben** von **91 Wurzeln** entnommen und analysiert. Zudem wurden von **33** dieser Bäume Bohrkern für ergänzende dendrogeomorphologische Untersuchungen extrahiert (Tabelle 5.1).

Tab. 5.1: Übersicht Datenmaterial, Anzahl der jeweiligen Datengrundlage.

	Spezies	Proben- bäume	Wurzeln	Wurzel- scheiben	Dünn- schnitte	Referenz- bäume
Testfeld 1 u. 2	<i>Fagus sylvatica</i> L.	10	21	94	86	
Testfeld 2	<i>Pinus sylvestris</i>	5	13	48	48	
Testfeld 2	<i>Fraxinus excelsior</i>	3	7	22	22	
Natürlich freigelegt	<i>Fagus sylvatica</i> L.	15	50	180	162	
Summe		33	91	344	318	74

Für die Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse an der Wellenkalk-Schichtstufe wurde der Schwerpunkt auf *Fagus sylvatica* L. gelegt, da es sich dabei um die dominierende Baumart in den Untersuchungsgebieten handelt.

Vor der Probennahme wird das Umfeld kartiert, die Wurzel vermessen und die Lage der Wurzel innerhalb der Spalte festgehalten. Grundsätzlich muss bei der Probennahme auf einen Mindestabstand von ca. 100 bis 110 cm (vgl. KRAUSE & ECKSTEIN 1993) zum Stammanlauf geachtet werden, da in diesem Bereich die Stabilität des Baumes durch exzentrisches Wachstum der Wurzeln verbunden mit Reaktionsholz gewährleistet wird (vgl. Kap 2.3).

Vor der eigentlichen Entnahme wurden auf der Wurzeloberseite und an der Grenze Wurzel/Substrat Markierungen angebracht, die bei der Präparation und Auswertung im Labor die Einordnung erleichtern. Weiterhin wurde die Wuchsrichtung der Wurzel festgehalten.

Für die Auswertung des Wachstumsverlaufs sollten drei Abschnitte einer Wurzel untersucht werden:

1. Freigelegter Bereich
2. Übergang Freilegung – Substrat
3. Ungestört im Substrat verblieben

Durch die Analyse der drei aufgeführten Abschnitte sind Veränderungen in der holzanatomischen Jahrringstruktur deutlicher zu erkennen. Soweit die Beschaffenheit des Substrates das Ausgraben eines ungestörten Teils der Wurzel zuließ, konnten alle drei Bereiche zusammenhängend als Ganzes entnommen werden. Im Labor wurden die einzelnen Wurzelstränge nochmals genauer vermessen und die Stellen festgelegt, aus denen Wurzelscheiben zu entnehmen waren. Vor der Entnahme wurde die Position der zu entnehmenden Scheiben markiert, fotografisch festgehalten und die entsprechenden Distanzen notiert (Abbildung 5.1).



Abb. 5.1: Foto einer vermessenen Wurzelprobe mit markierten Positionen der zu entnehmenden Wurzelscheiben.

Aus den Stämmen mit freigelegten Wurzeln wurden Bohrkern mit Hilfe eines Zuwachsbohrers entnommen. Dabei musste darauf geachtet werden, dass der Bohrer mit Ausrichtung zum Mark und senkrecht zur Stammachse geführt wird. Mit einer Metallzunge wurde der Bohrkern aus dem



Abb. 5.2: Zuwachsbohrer zur Probenahme am Stamm einer *Fagus sylvatica* L.

Zuwachsbohrer extrahiert (Abbildung 5.2).

Aus jedem Probenbaum an den Spalten wurden vier Bohrkern mit den Bohrrichtungen *a*, *b*, *c*, *d* (vgl. Kap. 5.4) in 1,30 m Höhe entnommen. Die Höhe der Bohrkernentnahme hat sich als konventionelle Größe durchgesetzt (MITSCHERLICH 1970).

An den Referenzstandorten (vgl. Kap. 5.1) erfolgte die Beprobung der Bäume in den Bohrrichtungen *a* und *b*. Somit wurde der Einfluss eventuell auftretender Reaktionsholzbildung z.B. an Standorten mit starker Neigung minimiert.

Der Faktor Wind konnte vernachlässigt werden, da entsprechend der Hauptwindrichtung kaum phenologische Anzeichen für einen Kompensationswuchs in eine bestimmte Richtung zu verzeichnen war.

Ein von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL) neu entwickeltes Probenahmegerät (Increment Puncher, FORSTER et al. 2000) kam versuchsweise bei den Wurzeln zum Einsatz. Allerdings stellte sich heraus, dass die gewonnene Probenmenge für die holzanatomische Analyse zu klein war.

#### 5.4 Codierung und Präparation der Proben

Eine genaue Beschriftung der einzelnen Proben ist für die spätere Auswertung von erheblicher Bedeutung, da nur sie eine Zuordnung der Proben zu den Standorten bzw. eine Lagebestimmung von Wurzeln und Wurzelscheiben erlaubt. Die Codierung der einzelnen Wurzelproben und Bohrkern wurde auf der Grundlage eines achtstelligen Codes durchgeführt (vgl. GÄRTNER 2003). Die achtstellige Syntax ist auf das Jahrring-Messprogramm TSAP (vgl. Kap.5.5.1) zugeschnitten. Die ersten sieben Stellen erlauben eine genaue Identifikation des Baumes, mit der achten Stelle werden die einzelnen Bohrproben des Stammes bezeichnet (Abbildung 5.3). Für die Codierung verschiedener Wurzeln pro Baum werden die Buchstaben e bis l verwendet. An achter Stelle eingesetzt, erlaubt diese Kennzeichnung eine genaue Zuordnung der jeweiligen Wurzeln zum Baum. Im Zuge der Untersuchung werden aus jeder Wurzel Scheiben entnommen. Damit eine genaue Identifizierung der einzelnen Wurzelscheiben erfolgen kann, ist eine Modifizierung des achtstelligen Codes notwendig. Eine Erweiterung auf neun Stellen ist leider nicht möglich, da das Jahrringmessprogramm TSAP (Kap 5.5.1) nur eine achtstellige Bezeichnung verarbeiten kann.

Code stelle	1	Bearbeiter	S (= Sahling)	
	2	Land	D (= Deutschland)	
	3	Lokalität	B (= Bleicheroder Berge)	
			D (= Dün)	
			M (= Grenzholz/Dün)	
			E (= Eichsfeld)	
	4+5	Standortnummer	T (= Treffurt/Ringau)	
			H (= Hainich)	
6+7	Baumnummer	01, 02, 03, ...		
8	Probe	a, b, c, d (= Bohrrichtung, Bohrkern) e - l (= Wurzelprobe zum Baum)		

Abb. 5.3: Codierung der Bohrkern und Wurzelproben (nach GÄRTNER 2003; verändert).

Deshalb wird die erste Codestelle durch eine Ziffer ersetzt (0 bis 9). Mit Hilfe dieser Kompromisslösung ist es möglich bis zu zehn Wurzelscheiben einer Wurzel zuzuordnen. Folgendes Beispiel soll diese Vorgehensweise verdeutlichen:

Aus der Wurzelprobe **S D B 0 5 0 1 e** werden zwei Scheiben entnommen (vgl. GÄRTNER 2003). Die Codierungen würden wie folgt lauten: **0 D B 0 5 0 1 e** und **1 D B 0 5 0 1 e**.

Aus den drei beschriebenen Sektionen der Wurzelstränge (vgl. Kap. 5.3) werden insgesamt ca. fünf Scheiben entnommen. Diese ca. 5 bis 6 cm breiten Wurzelstücke werden in der Mitte zweigeteilt, so dass man von dieser Stelle zwei identische (spiegelbildliche) Querschnitte erhält. Alle Querschnitte bekommen eine Markierung an der Oberseite, bevor sie herausgesägt werden. Für eine korrekte Zuordnung der Scheiben und um eine einheitliche Auswertung zu gewährleisten, werden die Querschnitte auf der Stammseite für die makroskopische Analyse verwendet und die Querschnitte Richtung Wurzelspitze, für die Dünnschnittpräparation.

Die Scheiben werden mit zunehmend feiner werdender Körnung geschliffen, der Querschnitt für die makroskopische Analyse wird mit einer 600er Körnung feingeschliffen, während für das Gegenstück (Dünnschnittpräparation) eine 250er Körnung als Abschluss ausreicht (vgl. GÄRTNER 2003).

Für die Analyse mit dem Programm Image Pro Plus (vgl. Kap. 5.5.3), ist die Anfertigung von Dünnschnitten erforderlich, da nur unter einem Durchlichtmikroskop und dessen möglichen Vergrößerungen Veränderungen in den Zellstrukturen des Holzes zur erkennen sind.

Die Präparation von Dünnschnitten wird unter anderem von CUTLER (1978), GÄRTNER (2003), ROBARDS (1985) bzw.

SCHWEINGRUBER (1978, 1990, 2001) beschrieben. Aber auch die Art der Präparation variiert je nach dem zu untersuchenden Material, oder der Fragestellung (u.a. KUTSCHERA & SOBOTIK 1992).

Im Zuge der makroskopischen Analyse der Wurzelscheiben werden Bereiche des Querschnittes festgelegt, die Veränderungen der Zellstruktur andeuten. Diese werden markiert und mit einem Messer oder Beil heraus herausgelöst. Dabei sollte die Breite 1,5 cm nicht überschreiten. Die Länge ist abhängig von dem Durchmesser der Wurzelscheibe, sollte jedoch 7 cm nicht übersteigen (Abbildung 5.4). Für die Betrachtung von Veränderungen der Zellstruktur ist die Einbeziehung des Zentralzylinders der Wurzel vorteilhaft.

Im Laufe der Laborarbeiten hat sich gezeigt, dass ein beidseitiges seitliches Anschleifen des heraus getrennten Blocks von Vorteil ist. Hiermit wird die Spannung innerhalb des Holzblockes

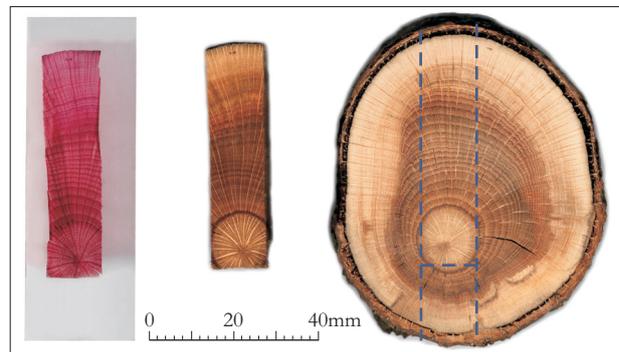


Abb. 5.4: Abtrennung des markierten Bereichs aus einer Wurzelscheibe zur Anfertigung eines Dünnschnitts (v.r.n.l.).

beim Fixieren im Schlittenmikrotom (Abbildung 5.5) minimiert. Die Anwendung von 75%igen Alkohol beim Schneiden erhöhte zudem die Stabilität von sehr langen Dünnschnitten.

Die 15 bis 20  $\mu$  starken Dünnschnitte werden nach dem Schnitt mit einer kombinierten Lösung aus Safranin und Astrablau eingefärbt. Nach ca. 3 bis 5 Minuten wird mit Hilfe von Alkohol in drei verschiedenen Konzentrationen (75%, 96%, wasserfreien Alkohol) die überschüssige Färbung entfernt und gleichzeitig das Präparat entwässert. Bevor der Dünnschnitt in Canada-Balsam (Harz) eingebettet werden kann, wird noch kurz mit Xylol gespült. Zum Schluss wird das Präparat unter einem Glasblättchen fixiert, mit einem Gewicht (50 g) beschwert und in einem Trockenschrank bei 60°C ca. 12 Stunden ausgehärtet (vgl. GÄRTNER 2003, SCHWEINGRUBER 1978).

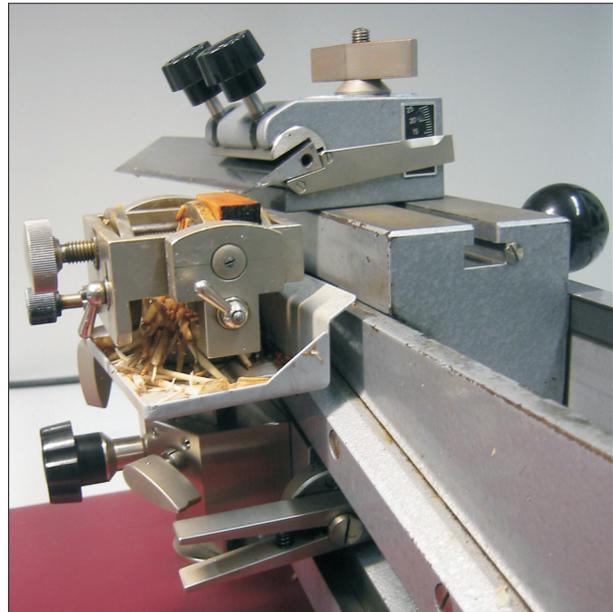


Abb. 5.5: Schlittenmikrotom mit fixiertem Präparat und eingespanntem Messer, im optimalen Schnittwinkel von 11°.

Die Bohrkerns werden nach der Probennahme auf ein Trägerholz geleimt, wobei auf die senkrechte Faserrichtung geachtet werden muss. Bei drehwüchsigen Bohrkernen ist es erforderlich, sie im Vorfeld zu brechen und neu auszurichten. Die Kerne werden dann senkrecht zur Faserrichtung angeschliffen, so dass eine geglättete Querschnittsfläche entsteht.

## 5.5 Materialauswertung

Die Auswertung beginnt mit einer optisch-visuellen Erfassung des Wachstumsmusters der Wurzelquerschnitte und Bohrkerns. Anhand der Datierung von Weiserjahren und Ereignisjahren erfolgt ein Vergleich bzw. eine zeitliche Einordnung der einzelnen Proben (vgl. SCHWEINGRUBER 1983,1990,1996) Es folgt die Erstellung der Datenreihen mit Hilfe eines Systems zur Messung und Auswertung von Jahrringbreiten (LINTAB & TSAP, vgl. Kap. 5.5.1) und dem Programm Image-Pro-Plus zur Analyse von Gefäßflächen innerhalb von Jahrringsequenzen der Wurzelquerschnitte (vgl. Kap. 5.5.4).

### 5.5.1 Jahrringbreitenmessung

Die Messung und Auswertung der Jahrringbreiten erfolgt mit dem Messtisch **LINTAB** (Digital **Linear Table**), einem angeschlossenen Computer und der Software **TSAP** (**T**ime **S**eries **A**nalysis **P**rogramm). Die Bohrkerne wurden von der Rinde Richtung Mark gemessen. Je nach Standort und Zeitraum der Probenahme, stellt der zuletzt gebildete Jahrring die Jahre 2003, 2004 bzw. 2005 dar (vgl. **Anlage 1**).

Um eine exakte Datierung von geomorphologischen Beeinflussungen innerhalb der Probenbäume und deren betroffenen Wurzeln zu gewährleisten, ist die Erstellung einer Referenzchronologie erforderlich.

Die Referenzkurven setzen sich aus den Baummittelkurven der jeweiligen Bäume der Referenzstandorte zusammen. Im Programm TSAP erfolgt ein Vergleich der beiden Radien (a) und (b) (vgl. Abb. 5.3) auf der Grundlage von statistischen Parametern. Eine Begutachtung der Synchronlage von Einzelkurven bedarf immer einer optischen-visuellen Kontrolle. Bäume mit geringer Gleichläufigkeit bzw. gestörtem Wachstum werden aus der Probenmenge entfernt.

Mit der Software TSAP wurde ein Crossdating durchgeführt, um die synchrone Lage der einzelnen Baummittelkurven untereinander zu prüfen. Die statistische Parameter Gleichläufigkeit (GLK), t-Wert (TWBP) (nach BAILLIE & PICHLER) und der Cross-Dating-Index (CDI) dienen zur Beurteilung der Zugehörigkeit zur Referenz. Jene Kurven, die in den Referenzbestand aufgenommen werden, dürfen folgende Schwellenwerte nicht unterschreiten: Gleichläufigkeit 60%, Cross-Dating-Index 10, t-Wert 3. Dieser Crossdating-Standard wird durch das Programm TSAP gesetzt (RINN 2003). Kurven, die vom synchronen Verlauf abweichen, werden überprüft, korrigiert oder aus der Probenmenge entfernt. Zur Einhaltung einer Mindestanzahl von drei Jahrringbreitenkurven werden die älteren Reihen verkürzt (vgl. FRITTS 1976, SCHWEINGRUBER 1996).

Alle Radien (a, b, c, d) der Probenbäume werden nach den oben erläuterten Verfahren überprüft und gemessen. Desweiteren erfolgt mit Hilfe der veränderten Referenzkurve nach CROOPER (1979) ein Abgleich mit den ermittelten Weiserjahren zur zeitlichen Einordnung der Einzelradien. Ein Gleichläufigkeitstest der Einzelradien mit den Baummittelkurven der Probenbäume, unter Verwendung der Referenzkurve, soll letzte Unstimmigkeiten des Kurvenverlaufs beseitigen.

Bei der Untersuchung von Bäumen auf Einflüsse durch Massenverlagerungen wird ein besonderes Augenmerk auf abrupte Wachstumswechsel (Reduktionen, Erholungen) und Zugholzerscheinungen (Exzentrizitäten) gelegt. Eine umfassende Berechnung der Exzentrizitätsindizes wie sie von BRAAM et al. (1987a, b) beschrieben werden, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht geleistet werden.

Zur Interpretation von Reduktions- und Zuwachsphasen werden alle vier Bohrkerne (a, b, c, d) makroskopisch analysiert und die betreffenden Stellen markiert. Auffällige Abweichungen vom „Normalverlauf“ werden notiert und gehen in die weitere Auswertung ein. Zugholzerscheinungen

(vgl. Kap. 2.3) sind Zeichen für Lageveränderungen des Baumes. Die Radien eines Laubbaumes unterscheiden sich ab den Zeitpunkt der Belastung auf Grund abweichender Jahrringbreiten und der Ausbildung von gelantinösen Fasern in den Zellen (SCHWEINGRUBER 2001, 2006).

In der Umgebung der Zugholzfasern ist die Anzahl und Größe der Gefäße reduziert. Die Form des Reaktionsholzes und die Lage im Stammquerschnitt verrät die Intensität bzw. die Richtung der wirkenden Kraft (vgl. SCHWEINGRUBER 2001).

Wie in Kapitel 3 dargestellt, werden auch extreme meteorologische Ereignisse als auslösende Faktoren von Massenverlagerungen genannt. Dieser Zusammenhang bildet die Grundlage zur Ermittlung von extremen Niederschlagsereignissen anhand von Daten des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der DDR und des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Eine Analyse von abrupten Wachstumswechseln im Zuge von geomorphologischen Prozessen soll den Zusammenhang von extremen Niederschlagsereignissen und Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe nochmals verdeutlichen.

Nach den Richtlinien des DWD wird als Starkregen ein Niederschlagsereignis bezeichnet, wenn es im Verhältnis zu seiner Dauer durch eine hohe Intensität gekennzeichnet ist (BAUMGARTNER & LIEBSCHER 1996). Meist werden für die Analyse Minuten- oder Stundenwerte verwendet. Für diese Untersuchung liegen teilweise nur Tageswerte bzw. zum großen Teil Monatswerte vor. Die optimale Anwendung der Definition des DWD ist aus diesem Grund nicht gegeben. Vielmehr wird in dieser

Tab. 5.2: Verzeichnis der Stationen (vgl. Lage Abb. 4.1) mit den entsprechenden Zeiträumen die durch die Niederschlagsmessstellen abgedeckt werden. Weiterhin wird angegeben ob es sich um Monats- oder Tageswerte von extremen Niederschlagsereignissen des jeweiligen Zeitraums handelt (Meteorologischer Dienst 1955, 1987, DWD).

Station	Höhenlage Meter über NN	Jahr $\bar{\varnothing}$ Nieder- schlag in mm	1901-1950	1951-1980	1971-1988	1979-2001	1999-2004
Bleicherode	305 m NN	690			X		
Worbis	330 m NN	692	X				
Leinefelde	356 m NN	687		X		X	X
Keula	423 m NN	715	X				
Hüpstedt	452 m NN	716	X				
Eigenrieden	480 m NN	785	X	X			
Dingelstädt	336 m NN	720	X				
Treffurt	180 m NN	609	X				
Eschwege	170 m NN	643					X
Tages- oder Monatswerte			Monat	Tag	Monat	Monat	Tag

Arbeit auf die Definition der unteren Grenze von intensiven Regenfällen nach WUSSOW (1922) zurückgegriffen. Nach seiner Formel ergibt sich eine Mindesthöhe eines Starkregenereignisses von 60 mm in 24 Stunden. Jedoch ist wie oben beschrieben nicht nur die Niederschlagshöhe entscheidend, sondern auch deren Intensität. Deshalb werden auch Maximalereignisse in die Analyse einbezogen, die unter diesem Grenzwert von 60 mm liegen. An dieser Stelle sei auf die Arbeit von BEYER (2002b) hingewiesen, in der die Verteilung von Starkniederschlägen an der Wellenkalk-Schichtstufe betrachtet wurden. Allerdings konnte BEYER (2002b) auf Grund der Datenlage nur den Zeitraum 1961 bis 1990 analysieren.

Für den Abgleich von holzanatomischen Veränderungen in Wurzeln und Bäumen sollte möglichst ein langer Zeitraum abgedeckt werden. Da nicht für jedes Gebiet und jede Station durchgehend Daten zur Verfügung standen, musste für entsprechende Zeitabschnitte auf unterschiedliche Stationen zurückgegriffen werden. Jedoch wurde immer versucht die Distanz zwischen Untersuchungsgebiet und Niederschlagsmessstelle so gering wie möglich zu halten. Alle verwendeten Stationen sind in Tabelle 5.2 zusammenfassend aufgeführt und in **Anlage 5** grafisch dargestellt.

### 5.5.2 Statistische Methoden

Zur Ermittlung von Weiserjahren wurde das Verfahren von CROPPER (1979) verwendet. Diese Methode beruht auf der Transformation von Rohwert – Baummittelkurven durch die Subtraktion eines 5-jährigen gleitenden Mittels. In den resultierenden Werten  $a_i$  (vgl. Formel I) ist allein das hochfrequente Signal enthalten. Anschließend wird der Indexwert  $a_i$  durch die Standardabweichung im definierten Zeitfenster dividiert (vgl. CROPPER 1979). Die Software TSAP ermöglicht die Berechnung und sofortige graphische Darstellung dieses Arbeitsschrittes (Formel I).

**Formel I:**

$$C_i = s \cdot a_i / \text{stdv}$$

**s = Skalierungsfaktor**

**$a_i$  = indexierte Werte**

Im Programm SPSS erfolgt die Berechnung der Standardabweichung zur Bestimmung der Grenzwerte der gemittelten Kurve. Nach HUGHES (1989) gelten alle Werte außerhalb der doppelten Standardabweichung als Weiserwerte.

Die Gleichläufigkeit ist ein Maß für die Ähnlichkeit der Intervalltendenzen von zwei Kurven (Tabelle 5.3). Der Gleichläufigkeitstest ermittelt die Tendenz der Wertezunahme oder -abnahme zwischen zwei aufeinander folgenden Zeitpunkten. Die Gesamtheit der Gleichläufigkeit über Intervalle stellt das Maß für die Ähnlichkeit der Intervalltendenzen von zwei Zeitreihen dar (SCHWEINGRUBER 1983, 1999). Entscheidend ist die Häufigkeit gleicher Richtungsänderungen und nicht die Stärke der jährlichen Schwankungen (RIEMER 1994). Das Programm TSAP gibt einen Schwellenwert von 60% vor, ab dem eine Übereinstimmung zweier Kurven gegeben ist (RINN 2003). Speziell für die

Erstellung der Referenzchronologien ist die Gleichläufigkeit ein Ausdruck der Homogenität eines Standortes (SCHWEINGRUBER 1983).

BAILLE & PILCHER (1973) führten den t-Wert in die Baumringdatierung ein und empfehlen eine Glättung der Kurven durch ein fünfjähriges gleitendes Mittel. Anders als der Korrelationskoeffizient ist der t-Wert immer positiv und kann Werte deutlich größer 1 erreichen. Im Unterschied zur Gleichläufigkeit beziehen sich die Korrelationen auf effektive Werte und nicht Intervalle. BAILLE & PILCHER (1973) legten einen Wert von  $t=3,5$  fest, oberhalb dessen ein hohes Ähnlichkeitsmaß zwischen zwei Zeitreihen gegeben ist. Als Standard des Cross-Datings ist im Programm TSAP der Schwellenwert auf  $t=3$  gesetzt (RINN 2003).

Tab. 5.3: Cross-Dating Parameters, zur Analyse von Jahrringbreitenkurven (User Reference, Jahrringmessprogramm TSAP-Win Professional, RINN 2003: 25).

Parameter	Equation	Explanation
Gleichläufigkeit	$Glk = \sum (y_{i_j} = x_{ij})$ in %	Sum of the equal slope intervals in %
Signature Gleichläufigkeit (SGlk.)	$SGlk = \sum (y_{i_j} = x_{ij})$ in %	Sum of the equal slope intervals in %, calculated referring to chronology signature years only
Standard Signature Gleichläufigkeit (_SGlk)		Sample= Sample series Reference= Chronology
Signature Standard-Gleichläufigkeit (S_Glk)		Sample= Chronology Reference= Sample series
Signature-Signature Gleichläufigkeit (SSGlk)		Sample= Chronology Reference= Chronology
Cross correlation (CC)	$CC = \frac{\sum (s_i - s) * (r_i - r)}{\sqrt{\sum (s_i - s)^2 * \sum (r_i - r)^2}}$	Standard cross-correlation, range: -1...1
T-Value	$t = \frac{CC * \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-CC^2}}$	Standard t-value
t-value Baillie-Pilcher (TV BP)		t-value after detrending with moving average with bandwidth =5 and logarithm to base e (BAILLIE and PILCHER 1973), max=100
t-value Hollstein (TV H)		t-value after detrending with the Wuchswert (HOLLSTEIN 1980), max=100 $w_i = \log \frac{y_i}{y_{i+1}}$
Cross Date Index (CDI)	$CDI = \frac{(G - 50 + 50 * \sqrt{\frac{overlap}{max\ overlap}}) * T}{10}$ $G = \frac{Glk + \_SGlk + S\_Glk + SSGlk}{n}$ $T = \frac{TVBP + TVH}{2}$ <i>(n = number of operators in the numerator)</i>	Date index, combined from t-values and Gleichläufigkeit, max=1.000

Die Methode des Cross Date Index (CDI) verknüpft die Informationen der Gleichläufigkeit und der t-Werte TVBP (t-Wert nach Baillie & Pilcher), TVH (t-Wert nach Hollstein) (vgl. Tab. 5.3, RINN 2003). Wie in **Kapitel 5.5.1** erwähnt liegt der Minimum Wert im TSAP für den Cross Date Index bei 10 (RINN 2003).

Nach COOK (1985) ist der Zuwachs eines jeden Jahres modellhaft in fünf Komponenten zerlegbar: Alter, Klima, endogene und exogene Einflüsse und ein zufallsbedingter Fehleranteil. Endogene Störungen und der Einfluss der Zufallskomponente werden mit zunehmender Anzahl ausgewählter Referenzbäume und durch Cross-Dating reduziert. Das Baumalter und die exogenen Faktoren, beteiligt sind auch geomorphologische Einflüsse, wird nach COOK (1985) durch Standardisierung abgeschwächt bzw. eliminiert. Deshalb wird von Indexierungen, wie sie für Klimauntersuchungen herangezogen werden, in dieser Arbeit abgesehen, da das wichtige geomorphologische Signal verloren ginge. Es werden zur Analyse der Einzelradien der Probenbäume ausschließlich korrigierte Zuwachskurven bzw. die Referenzchronologie verwendet.

### 5.5.3 Wurzelreaktionen

Die Jahrringbreitenmessung zur Altersbestimmung der Wurzelscheiben stellte sich als sehr schwierig heraus. Vor allem in den juvenilen Jahren sind die Jahrringgrenzen nur schwer auszumachen. Erst die Anfertigung von Dünnschnitten erlaubte eine genauere Analyse des Alters der jeweiligen Querschnitte. Dafür wurde der gemessene Einzelradius des Dünnschnittes mit den vier Radien des jeweiligen Wurzelquerschnitts synchronisiert, auf auskeilende Jahrringe hin überprüft und korrigiert (vgl. FRITTS 1976, SCHWEINGRUBER 1983, 1996).

Eine genaue zeitliche Einordnung von Veränderungen in der Zellstruktur (Gefäßgrößenreduktionen) und die Ausprägung der Jahrringe sollen die vermutete Belastung durch eine Spaltenöffnung bzw. Wurzelfreilegung bestätigen. Ausgangspunkt der Untersuchung ist dabei die bekannte Zellgrößenreduktion von Frühholzzellen bei Nadelhölzern um 50%, nach einer Freilegung (vgl. GÄRTNER et al. 2001). Bei der Anlegung der Testfelder wurden deshalb nicht nur Wurzeln von Buchen und Eschen künstlich freigelegt, sondern auch Kiefernwurzeln aus dem näheren Umfeld. Diese Proben geben die Möglichkeit, Strukturveränderungen im Zellaufbau bei Nadel- und Laubholz durch eine Freilegung gegenüberzustellen (vgl. **Kap. 5.1**). Detaillierte Untersuchungen dieser Strukturveränderungen erfolgen anhand der Dünnschnittpräparate. Die damit verbundenen notwendigen Zellgrößenmessungen werden im nun folgenden Kapitel erläutert.

### 5.5.4 Zellgrößenmessung (Image-Pro-Plus)

Die möglichen Strukturveränderungen im Zellaufbau der Wurzelquerschnitte nach einer Freilegung erfordern eine detaillierte Untersuchung von Gefäßen, Parenchymzellen und Librifasern. Dafür wurden zunächst alle Dünnschnitte bei unterschiedlichen Vergrößerungen betrachtet. Besonderheiten der einzelnen Jahrringe, wie Flächenanteil und Lage von Gefäßen, Größenreduktionen von Zellen und die Bildung von Thyllen (vgl. **Kap. 2.3**), wurden protokolliert.

Für die folgenden Zellgrößenmessungen wurden Fotos mit Hilfe einer digitalen Aufnahmeeinheit (Abbildung 5.6) erstellt. Als optimal für die digitalen Aufnahmen erwies sich eine 50-fache Vergrößerung. Alle zu untersuchenden Dünnschnitte wurden mit derselben Vergrößerung aufgenommen, damit eine Vergleichbarkeit der Proben untereinander gegeben ist. Mit dem Bildanalyseprogramm Image-Pro-Plus erfolgte die Auswertung der digitalen Bilder.

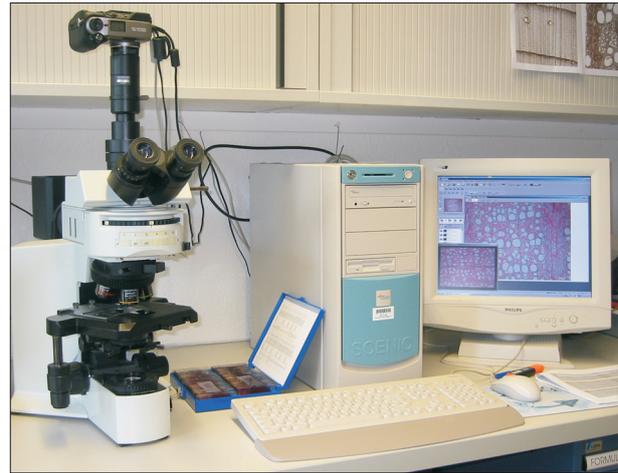


Abb. 5.6: Analyseanlage mit digitaler Aufnahmeeinheit.

Image-Pro-Plus ist ein Programm zur Bilderfassung mittels Mikroskops und anderer Systeme. Es sind einfache manuelle Messungen bis komplexe automatisierte Messungen mit spezieller Kalibrierung möglich. Die Daten werden mit Hilfe von Punktdiagrammen, Histogrammen, Linienprofilen oder Pseudofarben angezeigt und können über erstellte Makros in Excel exportiert werden. Für eine Messung wird der einzelne Jahring umfahren und somit als *area of interest* markiert (Abbildung 5.7).

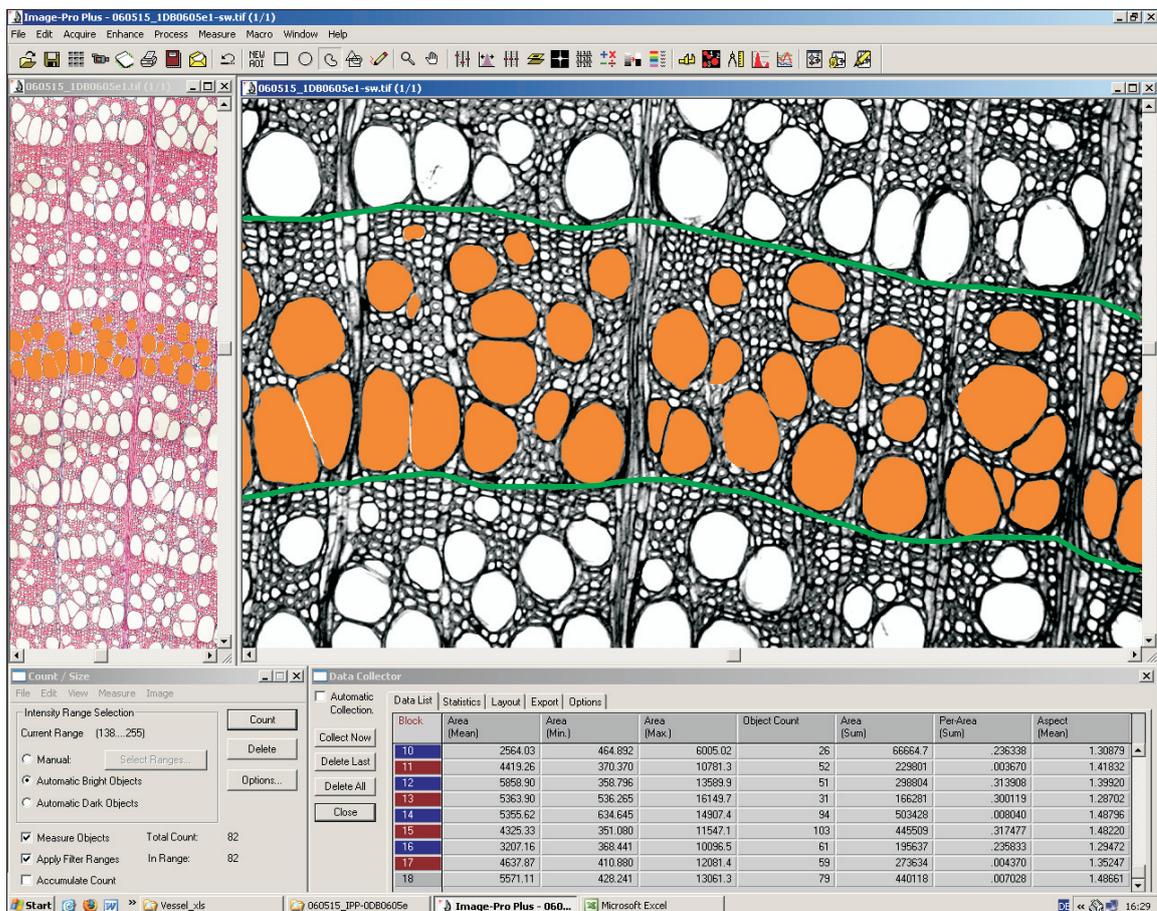


Abb. 5.7: Abbildung einer Arbeitsroutine aus dem Programm Image-Pro-Plus. Dargestellt ist ein Ausschnitt aus einem Jahring (area of interest, grün umrandet), mit vermessenen Lumenflächen der Gefäße (orange). Im unteren Teil der Abbildung sind die gemessenen Parameter aufgeführt.

Der umrandete Jahrring hat eine festgelegte tangentielle Breite von 2,7 mm, da er sich an der Vergrößerung (50-fach) orientiert. Die radiale Dimension richtet sich nach der eigentlichen Jahrringbreite. Innerhalb dieser *area of interest* wurden anhand von Größenschwellenwerten die Flächen der Früh- und Spätholzgefäße vermessen. Als Gefäße wurden Zellen definiert, deren Lumen zwischen  $350 \mu\text{m}^2$  und  $13000 \mu\text{m}^2$  lagen. Fehlmessungen im Bereich der Spätholzgefäße z.B. große Parenchymzellen im Libriformfasergewebe (vgl. **Kap.2.2**), wurden manuell aus dem Datensatz entfernt. Aus allen vermessenen Gefäßflächen pro Jahr wurde der Mittelwert gebildet. Weitere vermessene Parameter sind in **Tabelle 5.4** dargestellt (GARCIA & ECKSTEIN 2003, HANSEN 2002, SASS 1993, SASS & ECKSTEIN 1995, SPIECKER et al. 2000, PARK 2000).

Tab. 5.4: Erläuterung der gemessenen Parameter aus dem Programm Image-Pro-Plus.

<i>area mean</i>	Mittelwert aller Lumenflächen (Gefäßgrößen) in $\mu\text{m}^2$
<i>area min</i>	Minimum aller gemessenen Lumenflächen pro Jahrring in $\mu\text{m}^2$
<i>area max</i>	Maximum aller gemessenen Lumenflächen pro Jahrring in $\mu\text{m}^2$
<i>object count</i>	Anzahl der Gefäße
<i>area sum</i>	Gesamtlumenfläche aller gemessenen Gefäße pro Jahrring in $\mu\text{m}^2$
<i>per area</i>	Anteil der Gefäße an der Jahrringfläche ( <i>area of interest</i> )
<i>aspect mean</i>	Mittlere Rundungsgrad der Gefäße pro Jahrring
<i>diameter radial mean</i>	Mittlerer radialer Durchmesser der Gefäße pro Jahrring in $\mu\text{m}$
<i>diameter radial max</i>	Größter gemessener radialer Durchmesser eines Gefäßes pro Jahrring in $\mu\text{m}$

Um die Aussagen über den Verlauf der Kurven (Gefäßflächenmessung) statistisch abzusichern, wurden die zu untersuchenden Stichproben mit dem Programm SPSS analysiert.

Der Prüfung des Zusammenhanges zwischen den zu untersuchenden Parametern innerhalb eines Querschnittes, ging ein Test der Daten auf Normalverteilung voraus. Mit Hilfe des KOLOMOGROV-SMIRNOV-Anpassungstests (vgl. VOSS 2004, S. 488 ff.) wurden die Stichproben den folgenden Testverfahren zugeordnet. Bei *ungepaarten normal verteilten* Stichproben wurde mittels t-TEST (BORTZ 1999, S.137 ff, SACHS 1999, S. 351 ff.) geprüft, ob zwischen den Parametern ein signifikanter Unterschied besteht oder nicht. Obwohl die meisten Daten eine Normalverteilung aufwiesen, wurde zur Absicherung der Ergebnisse zusätzlich der verteilungsunabhängige MANN-WHITNEY-U-Test (vgl. SACHS 1999, S. 380 ff.) durchgeführt. Der intervariable Vergleich einzelner Querschnitte eines

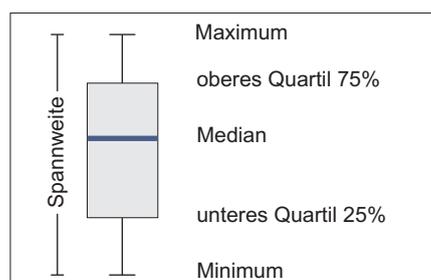


Abb. 5.8: Beispielhafte Darstellung eines Boxplot mit Erläuterungen (nach SACHS 1999: 149).

Wurzelstrangs erfolgte bei *normal verteilten* Differenzen, mittels dem t-TEST (BORTZ 1999, S.140 ff) zweier gepaarter Stichproben und dem Vorzeichen-Rang-Test von WILCOXON, bei *nicht normal verteilten* Differenzen (vgl. SACHS 1999, S. 410, VOSS 2004, S. 480).

Die Präsentation der ermittelten Werte erfolgt in Form von Boxplots (Abbildung 5.8) und der Auflistung der entsprechenden statistischen Maßzahlen in der **Anlage 4**.

## 6. Ergebnisse

### 6.1 Strukturen in künstlich freigelegten und nicht freigelegten Wurzeln

Auf der Stufenfläche der Bleicheröder Berge am Krajaer Kopf wurden zu zwei Zeitpunkten Wurzeln von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche), *Fraxinus excelsior* (Gewöhnliche Esche) und *Pinus sylvestris* (Waldkiefer) künstlich freigelegt.

Die parallele Freilegung von Koniferenwurzeln (*Pinus sylvestris*) diente zur Überprüfung der Freilegungsreaktion von Buche und Esche. Die von GÄRTNER (2003) nachgewiesenen Strukturveränderungen in den Frühholzzellen von Koniferen nach einer Freilegung, dienen als zusätzliche Kontrolle zur Verifizierung der Freilegungsreaktion von *Fagus sylvatica* L.

Die Bestimmung einer eindeutigen Freilegungsreaktion in Eschenwurzeln basierend auf der Analyse der Gefäßgrößenveränderung war nicht erfolgreich. Jedoch deuten holzanatomische Strukturveränderungen im Grundgewebe auf die Möglichkeit von Ansätzen für zukünftige Untersuchungen hin.

Da sich im weiteren Verlauf der Arbeit die Rotbuche als dominierende Baumart an der Wellenkalk-Schichtstufe herausstellte, wurde der Schwerpunkt ausschließlich auf *Fagus sylvatica* L. gelegt. Gerade die Bereiche der initialen Spaltenbildungen an der Trauf, in großen Teilen der westlichen Schichtstufenlandschaft, waren durch den Bewuchs mit *Fagus sylvatica* L. geprägt.

#### 6.1.1 Holzanatomische Strukturen in freigelegten Koniferenwurzeln (*Pinus sylvestris*)

Zur Verifizierung der Freilegungsreaktion von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) und *Fraxinus excelsior* (Gewöhnliche Esche) wurden auf dem Testfeld zwei, 13 Wurzeln von 5 Kiefern (*Pinus sylvestris*) im gleichen Zeitraum freigelegt. Für die Dauer von zwei Vegetationsperioden, von März 2004 bis November 2005, lagen diese Wurzeln frei.

Anhand der in Abbildung 6.1 dargestellten Wurzelprobe, soll an dieser Stelle auf die Strukturveränderungen bei *Pinus sylvestris* nur kurz eingegangen werden, da entsprechende Analysen in aller Ausführlichkeit bei GÄRTNER 2003 dargestellt sind.

Für diese Untersuchung dient die bekannte Freilegungsreaktion von Koniferenwurzeln als Abgleich des Strukturwechsels in den künstlich freigelegten Buchenwurzeln.

Die Gesamtlänge der Wurzel betrug 72 cm, davon waren in dem oben genannten Zeitraum 36 cm freigelegt. Der Wurzel wurden zwei Scheiben aus dem nicht freigelegten Abschnitt, zwei Scheiben aus dem freigelegten Abschnitt und eine Scheibe aus dem Übergangsbereich zwischen diesen beiden Sektionen entnommen.

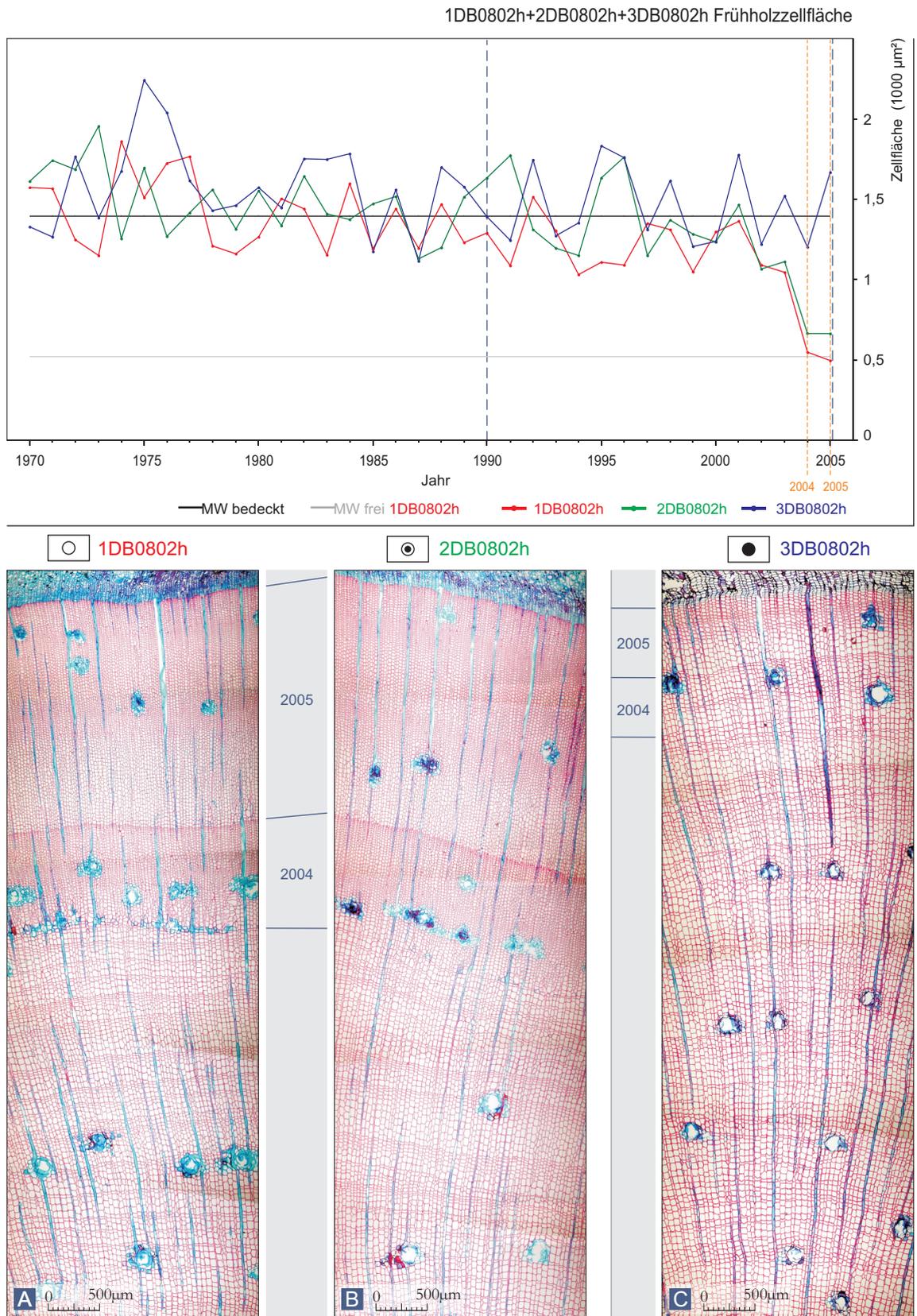


Abb. 6.1: Vergleich der Frühholzzellflächenmessungen zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel 1DB0802h (A), der Übergangszone Substrat/Freilegung 2DB0802h (B) und dem bedeckten Teil der Wurzel zum Zeitpunkt der Freilegung 3DB0802h (C), mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Wurzel 3DB0802h (MW bedeckt) und für den freigelegten Zeitraum (2004-2005, in den Dünnschnitten markiert) von 1DB0802h (MW frei 1DB0802h). Die durchschnittliche Tiefe der entnommenen Wurzelprobe betrug 18 cm. Der Bereich zwischen den blaugestrichelten Linien in der Kurvendarstellung entspricht dem Ausschnitt des jeweiligen Dünnschnitts.

In Abbildung 6.1 sind drei Dünnschnitte mit der dazugehörigen Zellflächenmessung der Frühholzzellen dargestellt. Wobei 1DB0802h (17 cm tief) aus der freigelegten Sektion stammt, 2DB0802h aus dem Übergangsbereich und 3DB0802h (19 cm tief) aus dem nicht freigelegten Abschnitt entnommen wurde.

Bei allen drei Proben sind die letzten beiden Jahre 2004 und 2005 markiert. Deutlich fällt die Jahrringbreitenzunahme in den Dünnschnitten 1DB0802h und 2DB0802h auf.

Im Jahr 2004 zeigen sich mit Beginn der Ausbildung der ersten Frühholzzellen Anzeichen für ein erhöhtes Aufkommen von Harzkanälen. Dies ist vermutlich die Folge von auftretenden mechanischen Belastungen nach der Freilegung im März 2004. Ähnliche Reaktionen, jedoch in nicht so ausgeprägter Form, zeigen sich im selben Jahr bei Probe 2DB0802h. Auf Grund ihrer Lage an der Grenze Freilegung/Substrat sind die Einflüsse der Freilegung auch hier wirksam.

Bei 1DB0802h und 2DB0802h wird die Größenreduktion der Frühholzzellen sichtbar.

Ein ganz anderes Bild bietet sich bei der Betrachtung von 3DB082h, aus dem nicht freigelegten Bereich der Wurzel: Keine Reduktion der Zellfläche im Frühholz und in 2005 nur eine leichte Zunahme der Anzahl an Spätholzzellen.

Der Vergleich der Zellflächenmessungen macht den Unterschied deutlich. In 2004 erfolgt bei der Probe 1DB0802h eine Reduktion der Frühholzzellen um mehr als 50% (vgl. GÄRTNER 2003) und sinkt im Jahr 2005 noch weiter ab. Eine ähnliche Reduktion findet sich auch bei 2DB0802h, wobei die Kurve nicht ganz auf das Niveau von 1DB0802h fällt.

Der nicht freigelegte Teil der Wurzel (3DB0802h) bleibt anhaltend auf dem Niveau der Vorjahre und zeigt keine Anzeichen für eine Freilegung.

In den folgenden Kapiteln werden sowohl die Reaktionen auf die Freilegung, als auch die normale Wurzelstruktur von *Fagus sylvatica* L. aus unterschiedlichen Tiefen näher betrachtet. Ein Vergleich von freigelegten und nicht freigelegten Bereichen soll die holzanatomischen Veränderungen einer Freilegung von Buchenwurzeln (*Fagus sylvatica* L.) erstmals aufzeigen.

### **6.1.2 Holzanatomische Strukturen nicht freigelegter Wurzeln von *Fagus sylvatica* L.**

In Abbildung 6.2 sind zwei Dünnschnitte von *Fagus sylvatica* L. gegenübergestellt. Aufnahme (A) zeigt die Struktur eines Stammes in 1,30 m Höhe und Aufnahme (B) den „normalen“ Querschnitt einer nicht freigelegten Wurzel aus einer Tiefe von 16 cm unter Geländeoberfläche. Deutlich sind die unterschiedlichen Ausprägungen zu erkennen. Die Jahrringgrenzen im Stammholz (Abb. 6.2; A) sind deutlicher zu erkennen, vor allem durch die tangential abgeflachten marginalen Grundgewebezellen (3 bis 4 Zellreihen), die Halbringporigkeit (vgl. SCHWEINGRUBER 2001) und die verbreiterten Holzstrahlen. Das Grundgewebe ist verstärkt durch Fasertracheiden und Libriformfasern (Abb. 6.2; A, B) aufgebaut, wodurch auf eine erhöhte Stabilitätsfunktion geschlossen werden kann. Durch das dichtere Grundgewebe kommen die Parenchymzellen (Abb. 6.2; A) im

Stamm besser zur Geltung da sie sich durch ein größeres Lumen abheben.

In der Wurzel (Abb. 6.2; B) ist das Grundgewebe weniger dicht, da der Anteil der Fasern in den Hintergrund tritt. Die unregelmäßig verteilten backsteinförmigen Parenchymzellen sind durch die leichte blaue Färbung (Astrablau- für nicht verholzte Gewebe) im Grundgewebe zu erkennen.

Die Jahrringgrenze der Wurzel wird in der Regel von ein bis zwei Zellreihen aus abgeflachten Grundgewebezellen gebildet (Abb. 6.2; B).

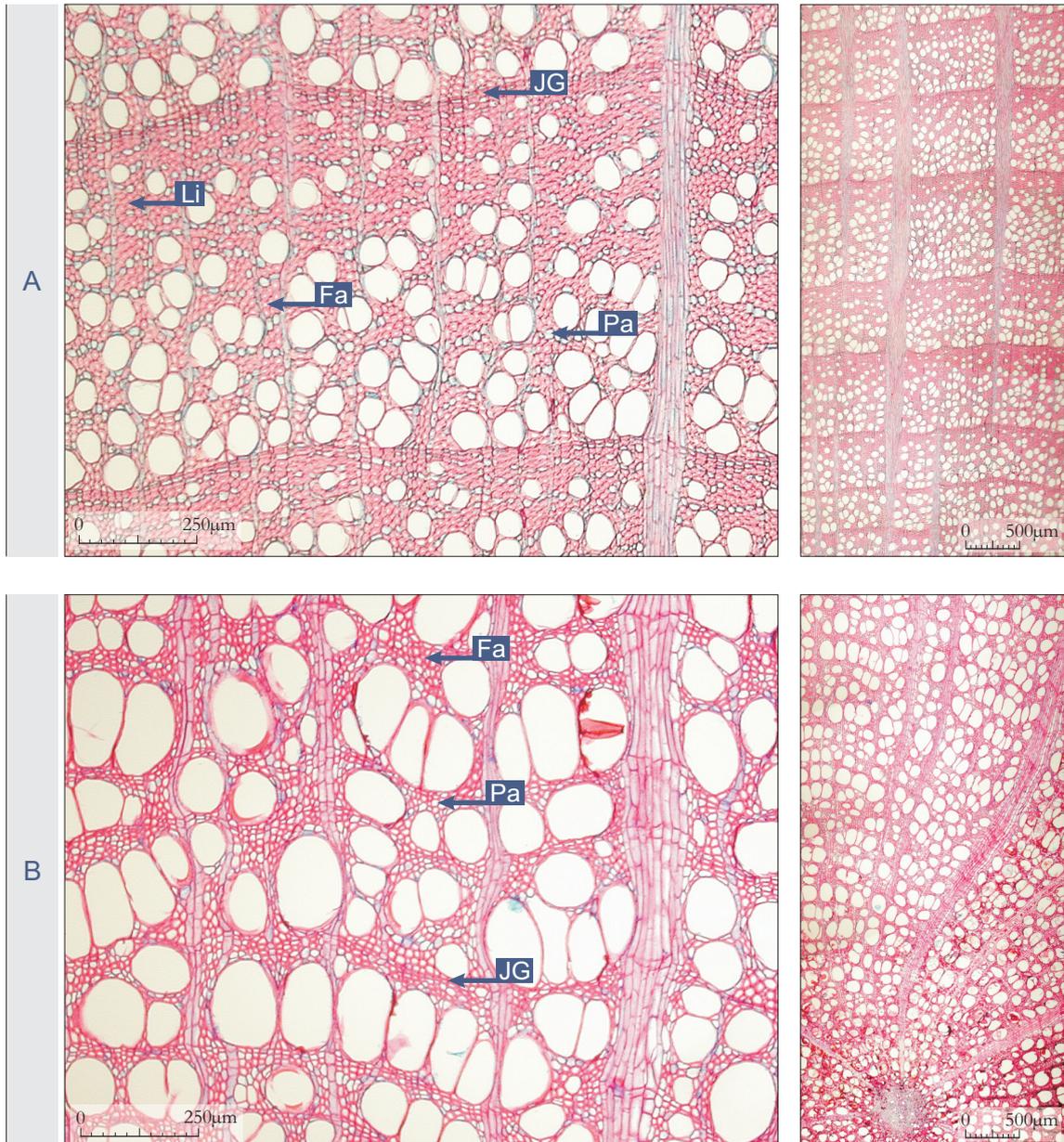


Abb. 6.2: Vergleich der holzanatomischen Struktur von Stamm (A) und Wurzel (B), einer Buche (*Fagus sylvatica* L.). Mit Pfeilen markiert sind: Li - Libriformfaser, Fa - Fasertracheide, Pa - Parenchymzelle, JG - Jahrringgrenze.

Auffallend ist in Abbildung 6.2 der Unterschied der Lumengröße der Gefäße. Man beachte dabei den gleichen Maßstab der Aufnahmen (A) und (B). Vor allem die Fühholzgefäße der Wurzel zeigen ein größeres Porenvolumen als die des Stammes. Der Jahrring der Wurzel ist aus einer Reihe von Frühholzgefäßen mit einem folgenden schmalen Band aus Gefäßtracheiden und eingestreuten

Parenchymzellen aufgebaut. Vereinzelt finden sich noch enge Gefäßelemente im Spätholz eines Jahrringes. Nur selten finden sich Faseranteile. Dagegen sind im Stamm über den Jahrring verteilt eine große Anzahl an Gefäßen auszumachen. Im Frühholz sind die Gefäße ebenfalls dicht stehend wie in der Wurzel, allerdings mit einem deutlich kleineren Lumen. Im Spätholz des Stammes nimmt die Porengröße der Gefäße ab und sie treten nur noch in kleinen Gruppen bzw. vereinzelt auf. Die auftretenden Unterschiede in der Struktur von Stamm und Wurzel sind Merkmale für die

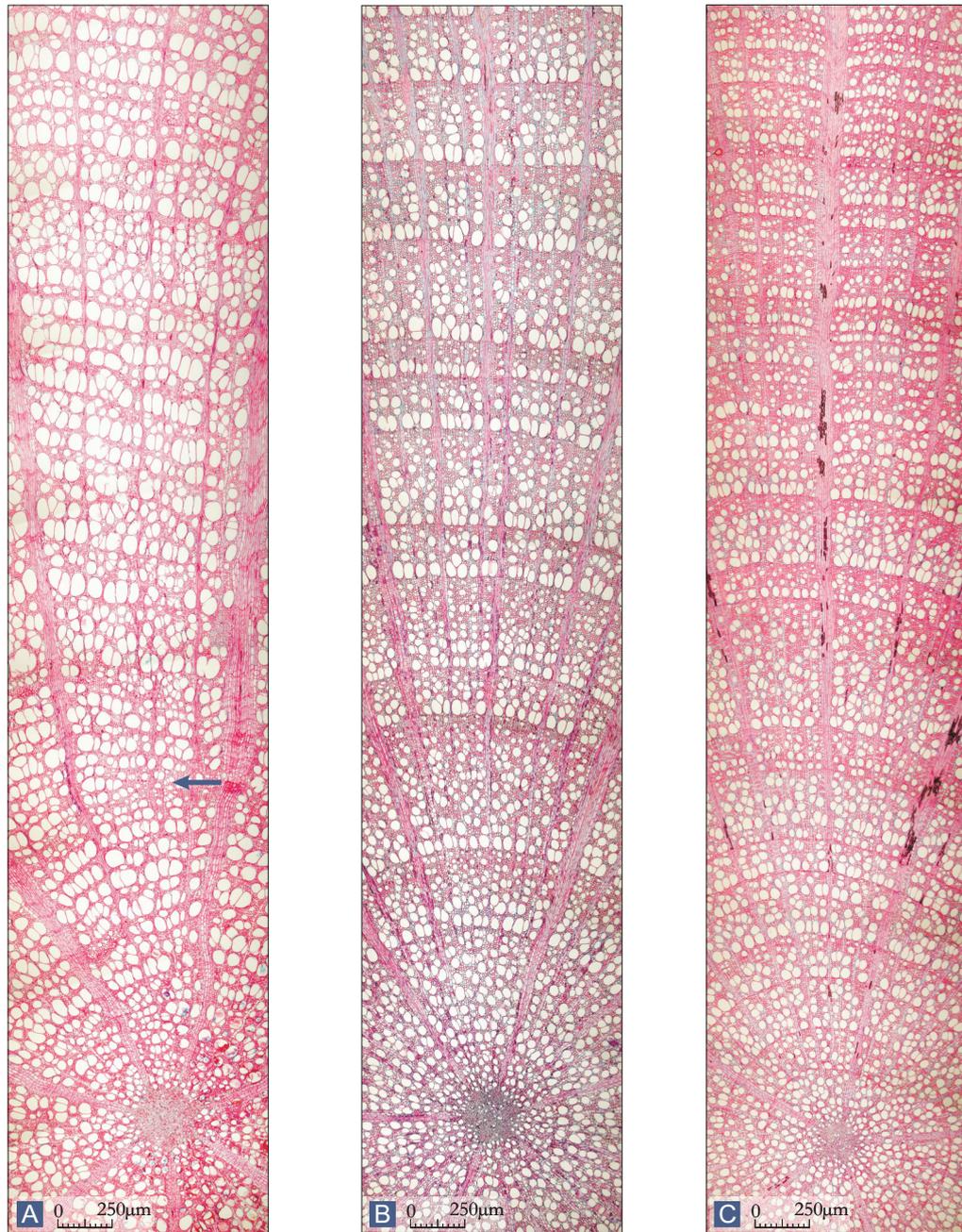


Abb. 6.3: Vergleich von Wurzelquerschnitten (*Fagus sylvatica* L.) aus unterschiedlichen Tiefen: A - 16 cm Tiefe, B - 10cm Tiefe, C - 4 cm Tiefe. Mit einem blauen Pfeil in Dünnschnitt A ist ein Bereich mit auskeilenden Jahrringen markiert.

differenzierten Funktionen der einzelnen Bereiche eines Baumes. Die Libriformfasern und Fasertracheiden des Stammes mit im Vergleich zur Wurzel verdickten Zellwänden, kleinem Zelllumen und erhöhter Anzahl sorgen für eine verbesserte Stabilität. Die Leitungsfunktion der

Wurzeln wird durch die markante Lumengröße der Gefäße und dem zahlreichen Auftreten von Parenchymzellen unterstrichen. Aber auch das zeitweise Fehlen von stützenden Elementen wie Fasertracheiden oder Libriformfasern deutet auf die dominante Funktion des Stofftransportes hin.

In Abbildung 6.3 sind Dünnschnitte von Buchenwurzeln aus unterschiedlichen Tiefen dargestellt. Die Strukturen der Wurzel aus 16 cm Tiefe zeigt ein sehr heterogenes Bild. Jahringgrenzen sind nur schwer auszumachen und zahlreiche auskeilende Jahrringe (Abb. 6.3, A, siehe Pfeil) prägen das Bild. Ab einer Tiefe von 10 cm ist das Jahrringbild deutlich homogener, dies ist auch auf ein vermehrtes Auftreten von Grundgewebezellen zurückzuführen. In der Wurzelprobe aus 4 cm Tiefe ist die durchschnittliche Gefäßgröße kleiner als bei den beiden anderen tiefer liegenden Proben. Alle drei dargestellten Dünnschnitte sind mit der gleichen Vergrößerung aufgenommen.

Aus den gezeigten Beispielen wird deutlich, dass es entsprechend der Tiefenlage einer Wurzel klar zuzuordnende Strukturen gibt. Die Veränderungen zeigen sich maßgeblich in der Häufigkeit des Auftretens der Grundgewebezellen, deren Zellwanddicke (Zunahme) und Zelllumen (Abnahme). Abbildung 6.4 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Wurzelprobe aus 4 cm Tiefe, in dem ein vermehrtes Auftreten von Fasertracheiden und Libriformfasern erkennbar ist. Der Anteil an Parenchymzellen ist nur gering reduziert. Die Zunahme der Faseranteile ist vermutlich Ausdruck von einsetzenden mechanischen Belastungen in Kombination mit Temperaturschwankungen, beeinflusst durch den Tagesgang der Bodentemperatur, in 4 cm Tiefe (vgl. Abb. 6.3).

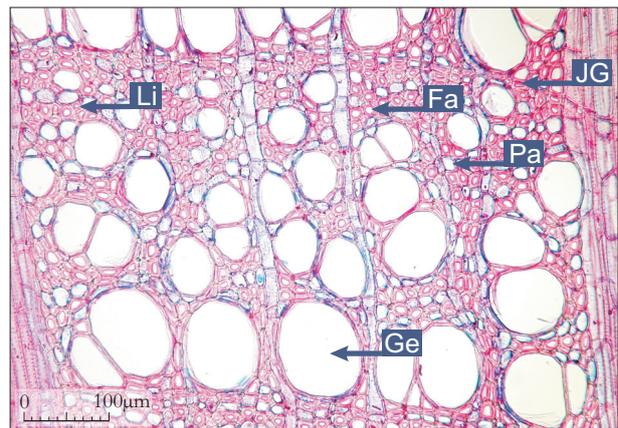


Abb. 6.4: Jahring mit Fasertracheiden und Libriformfasern als Ausdruck von Stabilitätstendenzen. Mit Pfeilen markiert sind: Li - Libriformfaser, Fa - Fasertracheide, Pa - Parenchymzelle, JG - Jahringgrenze, Ge - Gefäß.

Das Auftreten von stammähnlichen Jahrringstrukturen kann demzufolge nicht als Indiz für eine Freilegung herangezogen werden. Bei genauerer Betrachtung zeigen allerdings die Gefäßelemente Variationen

in der Größe und im Auftreten pro Jahrringfläche. Ob diese Veränderungen als Kriterium dienen können um eine Freilegung bzw. Annäherung an die Bodenoberfläche zu verifizieren, soll im nun folgenden **Kapitel 6.1.3** geklärt werden.

### 6.1.3 Holzanatomische Strukturen in Wurzeln nach künstlicher Freilegung bei *Fagus sylvatica* L.

Wie die Ergebnisse der Auswertung von nicht freigelegten Wurzeln aus unterschiedlichen Tiefen zeigen, ist die beschriebene stammähnliche Jahrringstruktur kein eindeutiges Merkmal für eine Freilegung der Wurzel. Die angedeuteten Veränderungen der Gefäßgrößen bilden den Ausgangspunkt für die Analyse von künstlich freigelegten Wurzeln.

Die folgenden Studien fokussieren deshalb hauptsächlich auf die Merkmalsveränderungen der Gefäße von *Fagus sylvatica* L., wobei die Jahrringausprägung nicht außer Acht gelassen wird. Nachfolgend wird an einigen Beispielen von künstlich freigelegten *Fagus sylvatica* L. Wurzeln die holzanatomische Reaktion auf eine schnelle Freilegung nachvollzogen.

Am Beispiel der Probe SDB0601e aus dem Testfeld 1 sollen die Freilegungsreaktionen im Detail besprochen werden. Im Anschluss werden die Merkmale durch weitere Proben aus dem Testfeld 2 gestützt.

Ende Juli 2003 wurde die Probe SDB0601e auf der Stufenfläche oberhalb des Massenverlagerungsgebietes Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge) über eine Länge von 50 cm künstlich freigelegt. In einer Tiefe von 13 bis 15 cm, mit einem Umfang von 14 cm und einer Entfernung zum Stammanlauf von 150 bis 210 cm wuchs die Wurzel 16 Monate in diesem freigelegten Zustand (Abbildung 6.5, A). Eine potentielle Abdeckung durch Laubfall während dieser Wachstumsphase und eine dadurch eventuell auftretende Beeinflussung der Freilegungsreaktion wurde durch regelmäßiges Entfernen gefallenen Laubes unterbunden. Somit wurde sichergestellt, dass die Wurzel über den gesamten Zeitraum den herrschenden atmosphärischen Bedingungen ausgesetzt war.



Abb. 6.5: Künstlich freigelegte Wurzelprobe SDB0601e (Pfeile) des Baumes SDB0601. A - Situation der Wurzel SDB0601e während 16-monatiger Freilegung; B - Situation am Tag der Wurzelentnahme.

Für die Auswertung des gesamten Wachstumsverlaufes wurden die in **Kapitel 5.3** beschriebenen drei Abschnitte untersucht. In Abbildung 6.5, B ist die Situation am Tag der Wurzelentnahme (1.12.2004) dargestellt. Zusätzlich zum freigelegten Wurzelteil wurde noch ein 20 cm langes, während der Versuchsphase bedecktes Stück derselben Wurzel freigelegt und entnommen. Somit konnten alle drei Sektionen nämlich, freigelegter Bereich, Übergang Freilegung-Substrat

und ungestört im Substrat verblieben, miteinander verglichen werden. Die weiße Markierung auf der Wurzel diente als Orientierung (Oberseite) für die spätere Auswertung.

Dem Wurzelstrang wurden aus den in Abbildung 6.6 dargestellten Bereichen jeweils zwei Wurzelscheiben entnommen (vgl. Kap. 5.3). Eine der beiden spiegelbildlichen Wurzelscheiben diente der makroskopischen Analyse und aus der zweiten Wurzelscheibe wurde ein Block zur Anfertigung der dargestellten Dünnschnitte herausgelöst. Die abgebildeten Dünnschnitte zeigen das Wachstumsverhalten der jeweiligen Sektion der Wurzel an.

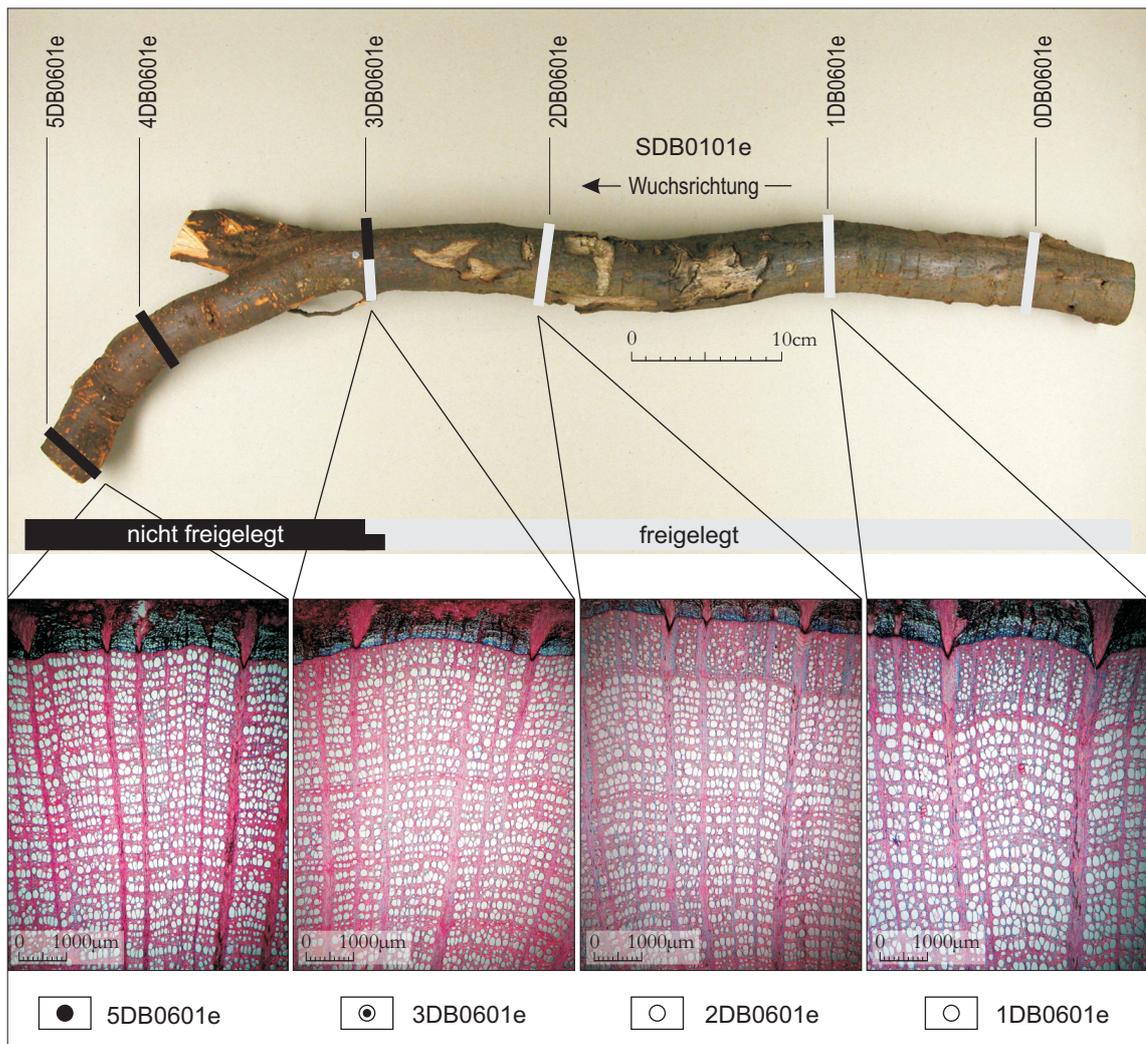


Abb. 6.6: Wurzelstrang SDB0601e, markiert sind die entnommenen Querschnitte (oben). Die entsprechenden Dünnschnitte aus den einzelnen Sektionen der Wurzel: nicht freigelegt - (5DB0601e), Übergangszone - (3DB0601e), freigelegt - (1DB0601e, 2DB0601e).

Der mikroskopische Vergleich der einzelnen Proben zeigt deutliche Unterschiede in der Ausprägung des letzten Jahrrings (2004) zwischen dem nicht freigelegten Bereich (5DB0601e), dem Übergangsbereich (3DB0601e) und dem freigelegten Bereich (2DB0601e) an (Abbildung 6.7). In den freigelegten Proben 1DB0601e und 2DB0601e ist eine Zunahme der Jahrringbreite zu verzeichnen (Abbildung 6.8 A, B). Mögliche Ursachen hierfür liegen wahrscheinlich in Druckunterschieden innerhalb des Substrates bzw. nach der Freilegung, die auf das sekundäre Dickenwachstum wirken. Ein zahlenmäßiger Zuwachs von Fasertracheiden und Librifasern

zeugt von steigender mechanischer Belastung innerhalb dieses Wurzelabschnittes. Das Fehlen des umgebenden Substrates führt möglicherweise zu einer geringen Instabilität der Wurzel in der freigelegten Sektion und somit zur verstärkten Ausbildung von Festigungsgewebe.

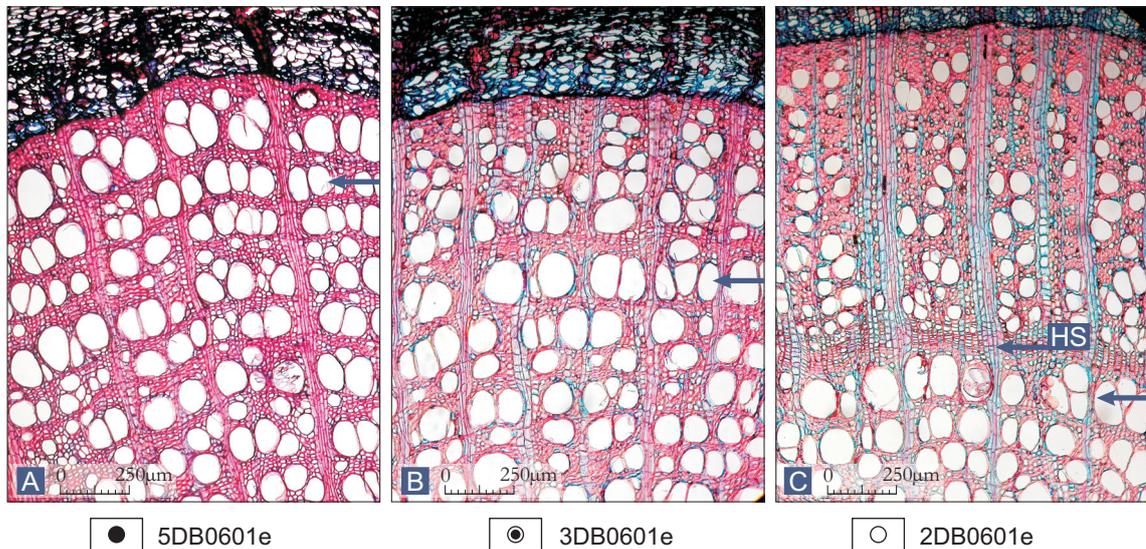


Abb. 6.7: Ausschnitte aus den einzelnen Dünnschnitten der drei Sektionen von Wurzel SDB0601e. A - nicht freigelegt (5DB0601e); B - Übergangzone (3DB0601e); C - freigelegt (2DB0601e). Die blauen Pfeile markieren jeweils die Frühholzgefäßreihe des Jahres 2003. Initialisierung eines breiteren Holzstrahls (HS) Pfeil.

Den markantesten Strukturwechsel vollziehen die Gefäße der freigelegten Proben 1DB0601e und 2DB0601e (Abb. 6.8). Da die Wurzel Ende Juli 2003 freigelegt wurde, sind die Frühholzgefäße des Jahres 2003 (vgl. Abb. 6.7, Pfeil) schon vollständig ausgebildet, so dass die künstliche Freilegung keinen Einfluss mehr auf deren Bildung haben konnte. Ab dem Jahr 2004 weisen jedoch alle Gefäße ein deutlich reduziertes Lumen im Vergleich zu den Vorjahren auf.

Weniger ausgeprägt ist die Reduzierung der Gefäßflächen in der Probe 3DB0601e, die den Übergangsbereich zwischen künstlicher Freilegung und Bedeckung markiert. Die Jahrringbreite dieser Probe in 2004 bewegt sich etwa auf dem Niveau der Vorjahre (vgl. Abb. 6.8, C) und ist vergleichbar mit den Jahrringbreiten der nicht freigelegten Probe 5DB0601e.

Die Gefäßflächen im Dünnschnitt 5DB0601e zeigen ein Ansteigen der Kurve in den Jahren 2003 und 2004 (vgl. Abb. 6.8, D). Mit einer Entfernung von 20 cm zu 3DB0601e und einer Tiefe von 15 cm, markiert dieser Teil das Wachstum in der nicht freigelegten Sektion der Wurzel.

In Abbildung 6.9 sind alle vier beschriebenen Kurven der Wurzel SDB0601e zusammenfassend dargestellt. Mikroskopisch ermittelte Veränderungen spiegeln sich in den Zellgrößenmessungen der einzelnen Proben wieder. Vor allem die Abnahme der Gefäßflächen im Jahr 2004, in den Proben 1DB0601e und 2DB0601e kennzeichnen den Zeitpunkt der künstlichen Freilegung. In beiden Dünnschnitten konnte eine Größenreduktion der Gefäßfläche von mehr als 50% im Vergleich zu den Mittelwerten der Vorjahre, festgestellt werden. Im Übergangsbereich ist die Reduzierung geringer ausgebildet als bei den freigelegten Proben. Betrachtet man die mittlere

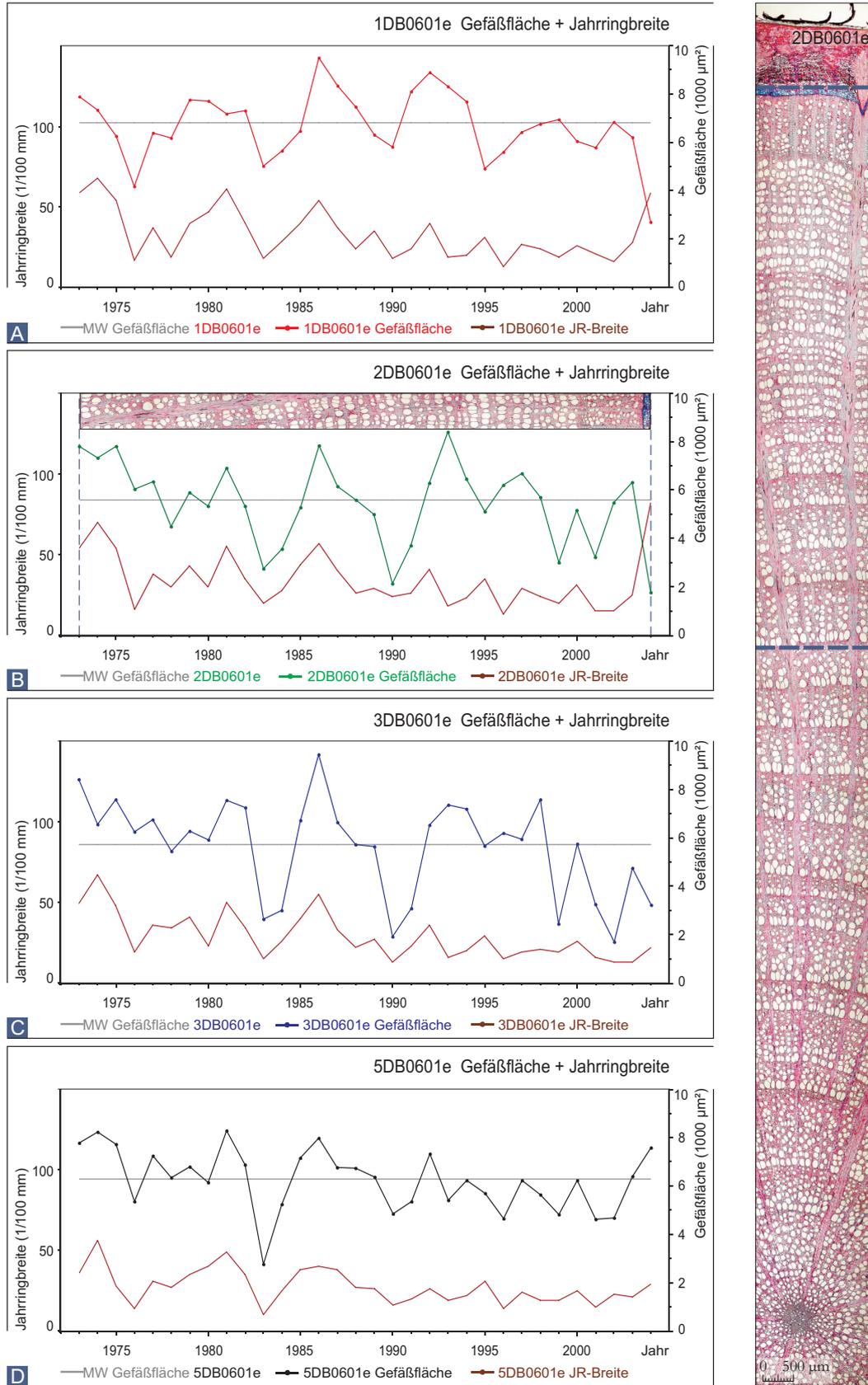


Abb. 6.8 (A-D): Vergleich der Gefäßflächenmessungen zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel - 1DB0601e (A), 2DB0601e (B) der Übergangszone Substrat/Freilegung - 3DB0601e (C) und dem zum Zeitpunkt der Freilegung bedeckten Teil der Wurzel - 5DB0601e (D). Für jeden Querschnitt sind jeweils die Gefäßgrößenmessungen und Jahringbreitenanalysen in einem Kurvendiagramm dargestellt. Der Dünnschnitt (rechts) entspricht im Ausschnitt der Messung im Diagramm (B).

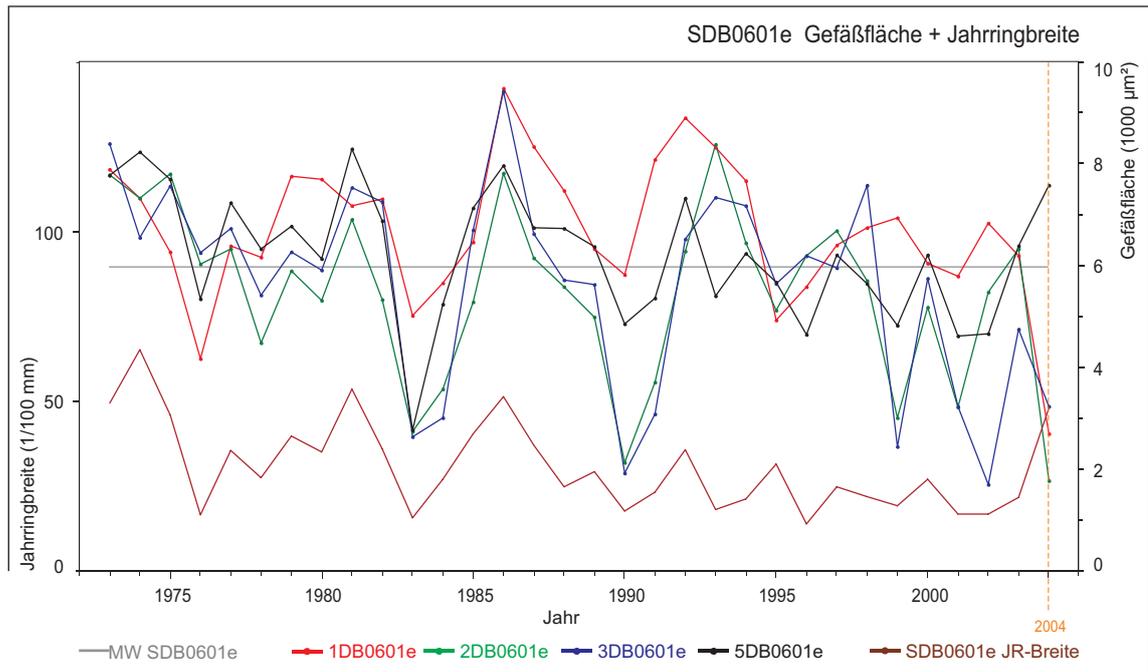


Abb. 6.9: Zusammenfassende Darstellung des Wurzelstrangs SDB0601e. Alle vier gemessenen Querschnitte sind dargestellt. Deutlich wird die Gefäßgrößenreduktion im Jahr 2004 in den Querschnitten 2DB0601e und 1DB0601e. Eine Zwischenstellung aus der Übergangszone Substrat/Freilegung nimmt 3DB0601e ein. Der bedeckte Teil der Wurzel zeigt einen Anstieg der Gefäßgrößen im Jahr 2004 (5DB0601e). Die Mittelkurve der Jahringbreiten verzeichnet eine leichte Zunahme der Jahringbreiten (SDB0601e JR-Breiten).

Gefäßfläche von 1973 bis 2003 so sind die Gefäßgrößen von 3DB0601e im Jahre 2004 um zirka 40% reduziert. Ein möglicher Einfluss des freigelegten Teils auf den Querschnitt 3DB0601e aus der Grenze zwischen Substrat und Freilegung kann hier nicht ausgeschlossen werden.

Eindeutig hingegen ist die Zunahme der Gefäßgrößen in 5DB0601e im ungestörten Bereich der Wurzel. Hier ist sogar ein Anstieg der Gefäßfläche um ca. 20% zum Mittelwert der Vorjahre zu verzeichnen.

Jedoch finden sich in allen Kurven immer wieder deutlich negative Einzelwerte. Mit Ausnahme des Jahres 1983 welches in der Wurzel SDB0601e als klimatisch bedingt angesehen werden muss, sind die anderen markant geringen Werte die Folge von auskeilenden Jahringen. In diesen Fällen reduziert sich die Gefäßgröße (Abbildung 6.10) allmählich innerhalb des auskeilenden Jahringes. Diese Reduzierung hält in der Regel aber nur für ein Jahr an und die Werte kehren dann wieder auf das Niveau der Vorjahre zurück. Somit ist immer eine wiederholte visuelle Kontrolle des Kurvenverlaufs anhand des Dünnschnittes enorm wichtig, um eben solche kurzzeitigen Abweichungen genau einschätzen zu können.

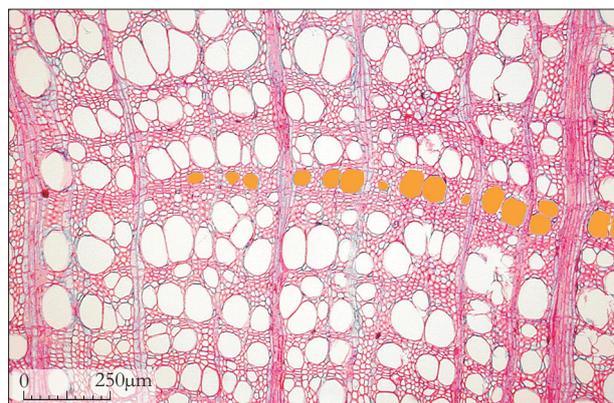


Abb. 6.10: Auskeilender Jahring in einer *Fagus sylvatica* L. Wurzel.

Somit ist immer eine wiederholte visuelle Kontrolle des Kurvenverlaufs anhand des Dünnschnittes enorm wichtig, um eben solche kurzzeitigen Abweichungen genau einschätzen zu können.

Die nun folgenden Beispiele untermauern den Befund, dass sich die Freilegung von *Fagus sylvatica* L. Wurzeln, in einer markanten Reduzierung der Gefäßgrößen widerspiegelt.

Die im Folgenden dargestellten Probenauswertungen aus dem Testfeld 2 sollen die Strukturveränderungen, im speziellen die Gefäßgrößenreduzierung, exemplarisch verdeutlichen. Für die Dauer von zwei Vegetationsperioden (04. März 2004 bis 15. November 2005) wurden ausgewählte Wurzeln im Testfeld 2 freigelegt.

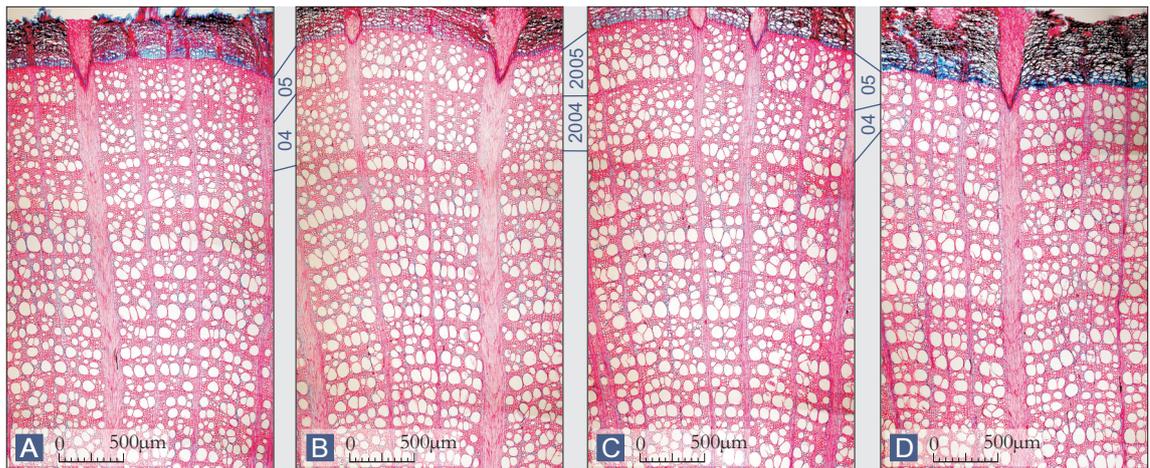
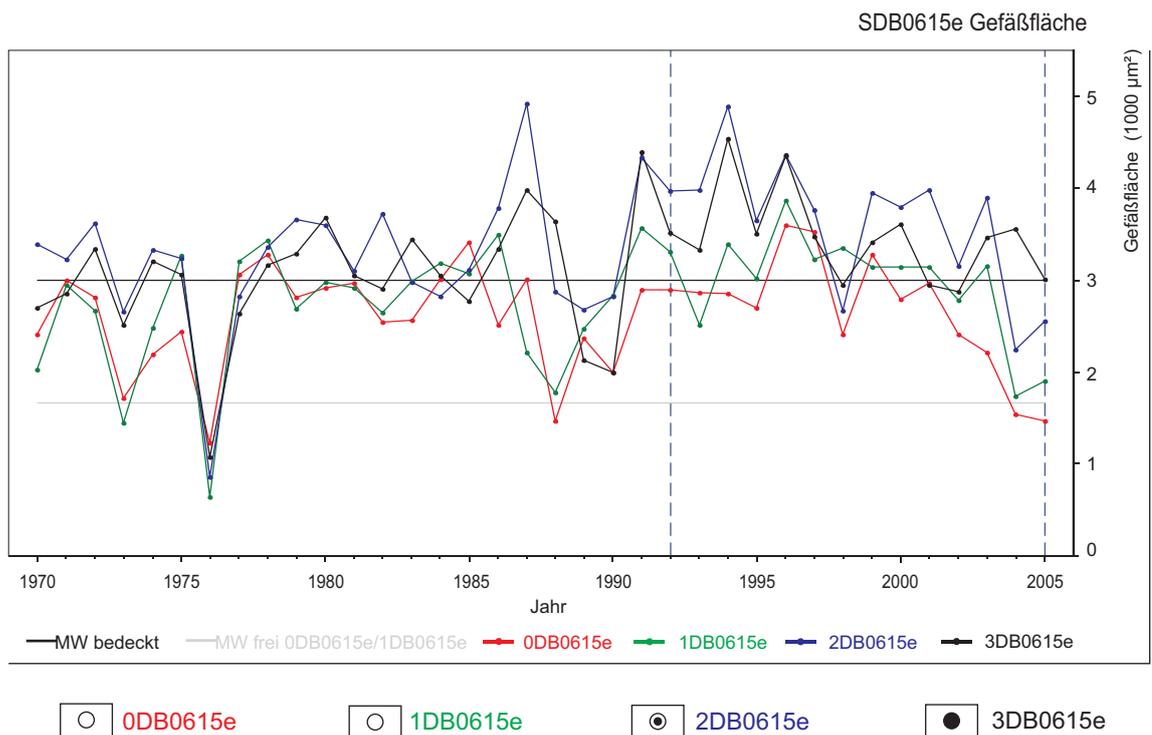


Abb. 6.11: Vergleich der Gefäßflächenmessungen (*Fagus sylvatica* L.) zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel - 0DB0615e (A), 1DB0615e (B), der Übergangszone Substrat/Freilegung - 2DB0615e (C) und dem bedeckten Teil der Wurzel zum Zeitpunkt der Freilegung - 3DB0615e (D). Der Mittelwert bedeckt (MW bedeckt) bezieht sich auf alle Kurven im nicht freigelegten Zeitraum. Der Mittelwert frei (MW frei) entspricht den Werten des freigelegten Bereiches dieser Wurzel (0DB0615e, 1DB0615e) in den letzten beiden Jahren 2004 und 2005. Die durchschnittliche Tiefe der entnommenen Wurzelprobe betrug 8 cm. Der Bereich zwischen den blau gestrichelten Linien in der Kurvendarstellung entspricht dem Ausschnitt des jeweiligen Dünnschnitts. In den Dünnschnitten sind die letzten beiden Jahre (2005, 2004) markiert.

In Abbildung 6.11 ist die Wurzel SDB0615e aus dem Testfeld 2 dargestellt. In einer Entfernung von 110 bis 173 cm vom Stammanlauf und einer Tiefe von 8 cm repräsentieren die Proben 0DB0615e und 1DB0615e künstlich freigelegte Bereiche der Wurzel SDB0615e. Zwei weitere Proben zeigen die Entwicklung der Gefäßgröße im Übergangsbereich (2DB0605e - 152 cm) und im nicht freigelegten Teil (3DB0605e - 160 cm) des Wurzelstrangs.

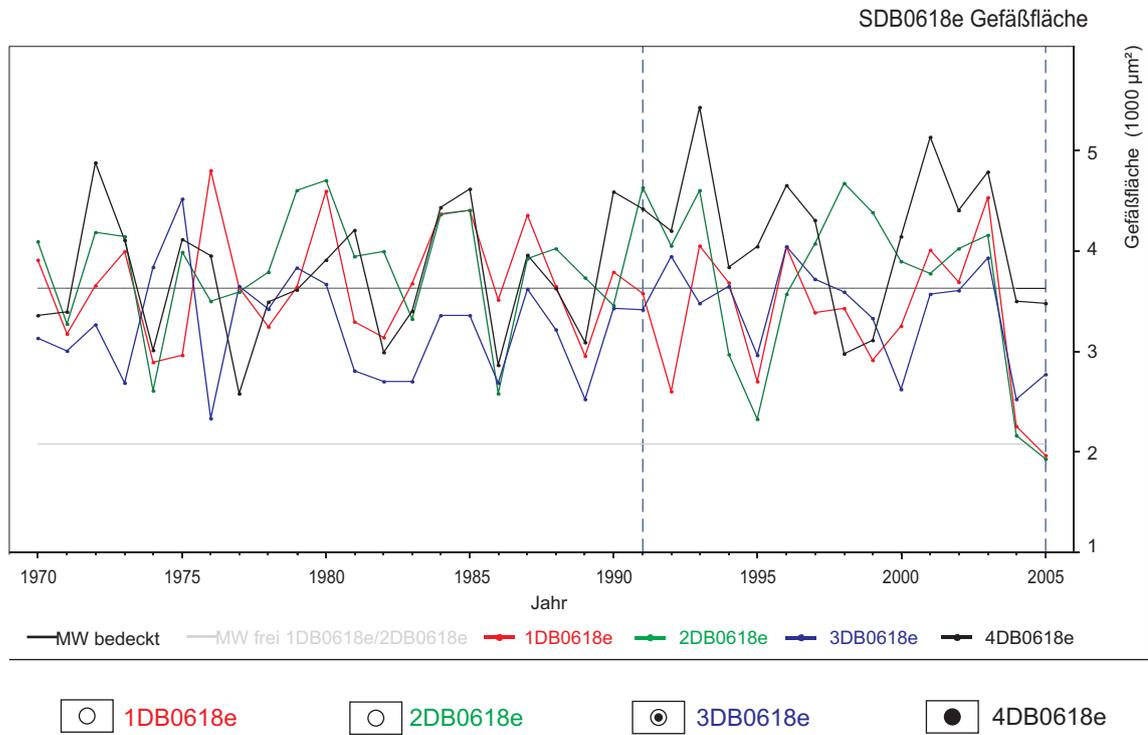


Abb. 6.12: Vergleich der Gefäßflächenmessungen (*Fagus sylvatica* L.) zwischen dem freigelegten Teil der Wurzel - 1DB0618e (A), 2DB0618e (B), der Übergangszone Substrat/Freilegung - 3DB0618e (C) und dem bedeckten Teil der Wurzel zum Zeitpunkt der Freilegung - 4DB0618e (D). Der Mittelwert bedeckt (MW bedeckt) bezieht sich auf alle Kurven im nicht freigelegten Zeitraum. Der Mittelwert frei (MW frei) entspricht den Werten des freigelegten Bereiches dieser Wurzel (1DB0618e, 2DB0618e) in den letzten beiden Jahren 2004 und 2005. Die durchschnittliche Tiefe der entnommenen Wurzelprobe betrug 12 cm. Der Bereich zwischen den blau gestrichelten Linien in der Kurvendarstellung entspricht dem Ausschnitt des jeweiligen Dünnschnitts. In den Dünnschnitten sind die letzten beiden Jahre (2005, 2004) markiert.

Anhand der Proben 0DB0615e und 1DB0615e wird deutlich, dass die Reaktion auf eine Freilegung unterschiedlich stark ausgeprägt sein kann. Die Reduktion der Gefäßgrößen im Jahr 2005, im Querschnitt 0DB0615e liegt bei immerhin 48% und im Querschnitt 1DB0615e bei ca. 36%, im Vergleich zu den durchschnittlichen Gefäßgrößen der Vorjahre. Ein Vergleich mit Gefäßgrößenmessungen der nicht freigelegten Probe 3DB0615e zeigt keine Anzeichen einer Freilegung obwohl sie nur 10 cm vom Übergang der Wurzel in das Substrat entfernt ist. Die Reduzierung der Gefäßgröße um ca. 5% zu den vorangegangenen Jahren bleibt im Rahmen der natürlichen Schwankungen des Wurzelwachstums (vgl. Abb. 6.11).

Eine weitere Probe aus 12 cm Tiefe (vgl. Abb. 6.12) zeigt eine deutliche Dreiteilung der Gefäßgrößen nach der Freilegung in Abhängigkeit von der Position der Querschnitte. 1DB0618e (43%ige Reduzierung) und 2DB0618e (48%ige Reduzierung) zeigen eine ähnlich deutliche Reduktion der Gefäßgrößen in den Jahren 2004 und 2005. Die Probe 3DB0618e markiert eine Zwischenstellung im Kurvendiagramm aber auch entlang des Wurzelstrangs, da dieser Querschnitt der Grenze Freilegung/Substrat entspricht. Der nicht freigelegte Teil zeigt sowohl in der Dünnschnittdarstellung als auch im Kurvenbild keine markante Reduzierung der Gefäßgrößen an.

Die beschriebenen Strukturveränderungen dienen als Grundlage für die Bestimmung von Freilegungsreaktionen von Laubhölzern in Zerrspalten der Wellenkalkschichtstufe. Ob diese Strukturveränderungen im Jahrringbild der Wurzeln von Laubhölzern auch länger anhaltend sind, wird in **Kapitel 6.3** näher betrachtet.

#### 6.1.4 Diagnostische Merkmale

Die in **Kapitel 6.1.2** dargestellten Beispiele stehen stellvertretend für die Auswertung aller Wurzeln von den Testfeldern 1 und 2. Anhand der künstlich herbeigeführten Freilegung der beschriebenen Wurzeln, konnten Strukturveränderungen aufgezeigt werden, die ausschließlich in freigelegten Laubholzwurzeln von *Fagus sylvatica* L. auftreten. Das entscheidende anatomische Merkmal für eine Freilegung ist die Reduzierung der Gefäßgrößen um mehr als 35% im Vergleich zu den Vorjahren. Die Untersuchungen von Strukturveränderungen im Zellaufbau, durch künstlich hervorgerufene Freilegung der Wurzeln von Laubhölzern, bildet die Grundlage für die Analyse der natürlich freigelegten Wurzeln an der Wellenkalk-Schichtstufe.

In **Kapitel 6.1.1** wurde schon darauf hingewiesen das ein Auftreten von stammähnlichen Strukturen in der Wurzel kein eindeutiges Indiz für eine Freilegung ist. Allerdings können, bei Einhaltung eines Mindestabstandes von 100 bis 110 cm zum Stammanlauf, diese Veränderungen im Jahrringbild Rückschlüsse auf die Tiefe der jeweiligen Wurzelprobe geben (vgl. Abb. 6.3). Anhand der Jahrringausprägung ist es somit möglich den Verlauf einer Freilegung (z.B. kontinuierlicher Abtrag) zu rekonstruieren. In Abbildung 6.3 wird weiterhin deutlich, dass mit

abnehmender Distanz zur Bodenoberfläche die Gefäßgrößen im Früh- und Spätholz kleiner werden. Dieses Merkmal ist entscheidend für die Bestimmung der Freilegungsreaktion.

Die bereits beschriebene Reduzierung der Gefäßgrößen kann in Verbindung mit weiteren holzanatomischen Veränderungen auftreten. Allerdings können diese Modifikationen der Wurzelstruktur zur Diagnose von Freilegungsreaktionen nur unterstützend wirken, da sie nur sporadisch und in ihrer Ausprägung sehr heterogen auftreten.

Ist die Freilegung mit dem Auftreten von mechanischen Belastungen verbunden, erhöht sich der Anteil an Fasertracheiden und Librifasern. Die Jahrringbreite nimmt abrupt zu, das Grundgewebe wirkt dichter und der Anteil an parenchymatischem Gewebe nimmt ab. Dies leitet einen Funktionswechsel der Wurzel ein, von einer Versorgungs- zu einer verstärkten Stabilitätsfunktion. In der Folge kann es zur Bildung von Thyllen bzw. zur Einlagerung von akzessorischen Substanzen (Kompartimentation) kommen, da eine Freilegung oftmals mit Verletzungen des Kambiums einhergehen (**vgl. Kap. 2.3**). Weiterhin kann es im Zuge einer Freilegung zur Initialisierung breiter Holzstrahlen kommen (vgl. Abb. 6.7, (HS)-Pfeil), wie auch zu einer Zuwachsreduktion.

Letztlich ist aber nur eine Größenreduktion der Gefäße um mehr als 35%, im direkten Vergleich zu den Vorjahren desselben Querschnittes, das eindeutige diagnostische Merkmal für eine Freilegung.

## 6.2 Geomorphologische Kartierung der Untersuchungsgebiete

In den bisherigen Ausführungen wurden die Ergebnisse der künstlichen Freilegung von Buchenwurzeln (*Fagus sylvatica* L.) der Testfelder 1 und 2 präsentiert. Die Grundlage für die Anwendung der holzanatomischen Analyse an natürlich freigelegten Wurzeln bildet die detaillierte Geländeaufnahme. Die erstellten geomorphologischen Detailkartierungen dienen der genauen Lagebestimmung der einzelnen Formen und erlauben einen Einblick in die zum Teil sehr chaotischen Lagerungsverhältnisse innerhalb der Massenverlagerungsgebiete. Die Aufnahmen ermöglichen weiterhin die genaue Einordnung der einzelnen Spaltensysteme in den jeweiligen Untersuchungsgebieten.

Der in **Kapitel 4.2** beschriebene Massenverlagerungsformenschatz ist in den untersuchten Gebieten in unterschiedlicher Ausprägung anzutreffen und wurde geomorphologisch kartiert, wobei die gesamte oberflächige Gestalt der Standorte erfasst wurde und die jeweilige Lage der Spalten und Probenbäume. Alle deutlich in Erscheinung tretenden Formen wurden vermessen und kartiert, um sie in den geomorphologischen Detailkartierungen maßstabsgerecht darzustellen. Der geomorphologische Formenschatz wurde nach dem im **Kapitel 5.2** beschriebenen Formeninventar eines Massenverlagerungsgebietes bestimmt.

Die Höhenlagen der Trauf innerhalb der einzelnen Untersuchungsgebiete liegen zwischen 380 und 515 m über NN (Tabelle 6.1), wobei das Massenverlagerungsgebiet Appental/Trefffurter Stadtwald (Ringau) (**Karte 7, Anlage 6**) mit 380 m über NN die geringste Höhe aufweist und Vollenborn am Dün (**Karte 2 u. 3, Anlage 6**) mit 515 m über NN den orographisch höchsten Punkt aller untersuchten Gebiete markiert.

Tab. 6.1: Absolute Höhenlage der Trauf in den untersuchten Massenverlagerungsgebieten.

Untersuchungsgebiete	Höhenlage Trauf
Krajaer Kopf / Bleicheroder Berge	455 über NN
Grenzholz / Dün	485 über NN
Ritterholz / Dün	490 über NN
Vollenborn / Dün	515 über NN
Junkerholz / Eichsfeld	450 über NN
Appental, Trefffurter Stadtwald / Ringau	380 über NN

Aus dem großräumigen Schichteinfallen ergibt sich bei fünf der sechs untersuchten Gebiete eine Charakterisierung als Frontstufe. Im Untersuchungsgebiet Appental/Trefffurter Stadtwald (Ringau) (**Karte 7, Anlage 6**) sind die Stufenhänge als Diagonal und Achterstufen ausgebildet.

In allen Gebieten finden sich Traufstufenhänge und Stufenabschnitte mit dem Stufenhangtyp Trauf mit Walm. In dem Untersuchungsgebiet Krajaer Kopf/Bleicheröder Berge (**Karte 1, Anlage 6**) ist der Übergang von der Stufenfläche zum Oberhang über die gesamte Breite des Stufenhangabschnittes als Trauf mit Walm ausgebildet. Hierbei leitet ein  $< 18^\circ$  geneigtes Hangsegment von der Stufenfläche in den Oberhang über. In den übrigen Gebieten kommt zu dem Stufenhangtyp Trauf mit Walm in unterschiedlichen Anteilen auch der Stufenhangabschluss Trauf hinzu, wobei der Oberhang und die Stufenfläche sich im orometrisch höchsten Punkt, im First der Schichtstufe verschneiden.

In einzelnen Abschnitten der Untersuchungsgebiete Vollenborn (Ost)/Dün, Ritterholz/Dün, Appental/Treffurter Stadtwald (Ringau), Grenzholz/Dün, finden sich entlang des Traufstufenhanges Abrißbereiche, in denen sowohl der First mit der Trauf als auch der Abriß des Massenverlagerungsgebietes verknüpft sind (**Anlage 6**).

Stratigraphisch liegt die Trauf der einzelnen Untersuchungsgebiete in einer der in **Kapitel 4.2** beschriebenen Härtlingszonen. Diese stark zementierten Zonen aus oolithisch kristallinen Kalken (vgl. LANGBEIN et. al. 1983) weisen eine hohe Verwitterungsresistenz auf. Die damit verbundenen geomorphologischen Eigenschaften führen zur Ausbildung des markanten Überganges von der Stufenfläche zum Oberhang.

Abgeleitet aus den geologischen Karten (GK 25) ergibt sich folgende stratigraphische Lage der Trauf: In den untersuchten Gebieten am Dün, den Bleicheröder Bergen und im Eichsfeld wird die traufbildende Härtlingszone durch die Oolith-Zone markiert. Nur im Untersuchungsgebiet Ringau/Treffurter Stadtwald, Appental bildet sich die Trauf in der Terebratel Zone aus.

In unmittelbarer Nähe zur Trauf, in verlängerten hangparallelen Achsen der Abrisswände und in Teilen der Stufenfläche finden sich die vermutlich jüngsten Formen der einzelnen Massenverlagerungsgebiete (vgl. **Karten 1 bis 7, Anlage 6, Spaltensignaturen**). Diese initialen Spaltenbildungen charakterisieren Bereiche rezenter Morphodynamik. Sie sind entscheidende Standorte für den Einsatz dendrogeomorphologischer Methoden und der Anwendung der holzanatomischen Analyse an natürlich freigelegten Wurzeln. Die Ausdehnung der Spalten und deren Größe schwanken von wenigen Dezimetern Breite und Länge bis zu Spaltensystemen mit Längen von mehreren Zehner Metern und Tiefen von 2 bis 10 m. Es wird vermutet, dass die Ausdehnung der Spalten wesentlich größer ist, da oftmals Teile der Spalten durch Muschelkalkschutt verfüllt sind oder schmalere Stellen von Vegetation und Bodenbedeckung verhüllt werden. Dies zeigt sich auch in Ausläufern, da in diesen Bereichen Tiefenlinien und muldenförmige Depressionen zu finden sind.

In diesem Zusammenhang sei auf die in den folgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse hingewiesen, da hier entsprechende Spalten mit natürlich freigelegten Wurzeln näher erläutert werden.

In allen kartierten Gebieten, sind im Bereich des oberen Stufenhanges Blockschollen zu finden, die auf Grund ihrer Geomorphologie auch als Mauerschollen (vgl. Abb. 3.2) bezeichnet werden.

Durch die Verlagerung sind Schluchten bis zu 15 m Tiefe entstanden (vgl. **Karte 5, Grenzholz, Dün**), die Längenausdehnung der Mauerschollen liegt zwischen 35 m (Ringau/Treffurter Stadtwald, Appental), 80 m (Bleicheröder Berge/Krajaer Kopf ) und 125 m, durch eine Tiefenlinie unterbrochen sogar bei 205 m (Dün/Ritterholz). Der Teil des oberen Stufenhanges der nicht durch Mauerschollen charakterisiert ist wird von einem Schuttmantel aus ungegliederten Wellenkalkschutt verhüllt. An den Abrisswänden finden sich Hangneigungen bis zu 90°, teilweise sind auch Überhänge zu verzeichnen, wobei Steilstufen bis zu 20 m (Bleicheröder Berge/Krajaer Kopf) entstehen.

Oft finden sich sekundäre Abrißwände an den hangabwärts gerichteten Seiten der Mauerschollen die durch Hangneigungen von 29° bis 41° gekennzeichnet sind.

Weite Bereiche der unteren Stufenhänge werden durch eine Vielzahl von Formen eines Massenverlagerungsgebietes charakterisiert. Vertreten sind Wall-, Rücken- und Fußschollen (vgl. **Kap. 3**). Weitere geomorphologische Details sind in den einzelnen Karten generalisiert dargestellt. An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass es nicht Aufgabe dieser Arbeit ist, jede Einzelform zu besprechen. Die geomorphologischen Kartierungen geben dem Betrachter die Möglichkeit Lagebeziehungen von einzelnen Formen herzustellen und vor allem die initialen Spaltenbildungen innerhalb der einzelnen Massenverlagerungsgebiete zu verifizieren.

### 6.3 Strukturen natürlich freigelegter Wurzeln

Grundlage für die Untersuchung von natürlich freigelegten Wurzeln an verschiedenen Standorten der Wellenkalk-Schichtstufe bilden die Analyseergebnisse der Testfelder 1 und 2 auf der Stufenfläche der Bleicheröder Berge (**Kap. 6.1.2**).

In den folgenden Kapiteln werden die Auswirkungen unterschiedlicher Arten der Freilegung erläutert. Anhand verschiedener Beispiele werden ausführlich die entsprechenden Reaktionen auf eine *schnelle, kontinuierliche* und *phasenweise* ablaufende Freilegung präsentiert.

#### 6.3.1 Schnelle Freilegung

Am Beispiel einer Wurzel von *Fagus sylvatica* L. vom Standort Krajaer Kopf/ Bleicheröder Berge (**Karte 1, Krajaer Kopf/ Bleicheröder Berge**) wurden auftretende Veränderungen in der holzanatomischen Struktur, hervorgerufen durch eine schnelle Freilegung, analysiert.

Die betreffende Wurzel befindet sich in einer Spalte des Massenverlagerungsgebietes westlich einer Mauerscholle (**vgl. Karte 1, Standort SDB05**). In Abbildung 6.13 (A und B) ist die Situation am Standort dargestellt. In Wurzelnähe ist die Spalte 122 cm breit, ihre messbare Tiefe beträgt 100 cm. Tiefere Bereiche sind mit Muschelkalkschutt verfüllt. Die entnommene Wurzel ist 154 cm lang und hat eine Mindestentfernung zum Stammanlauf von 285 cm.

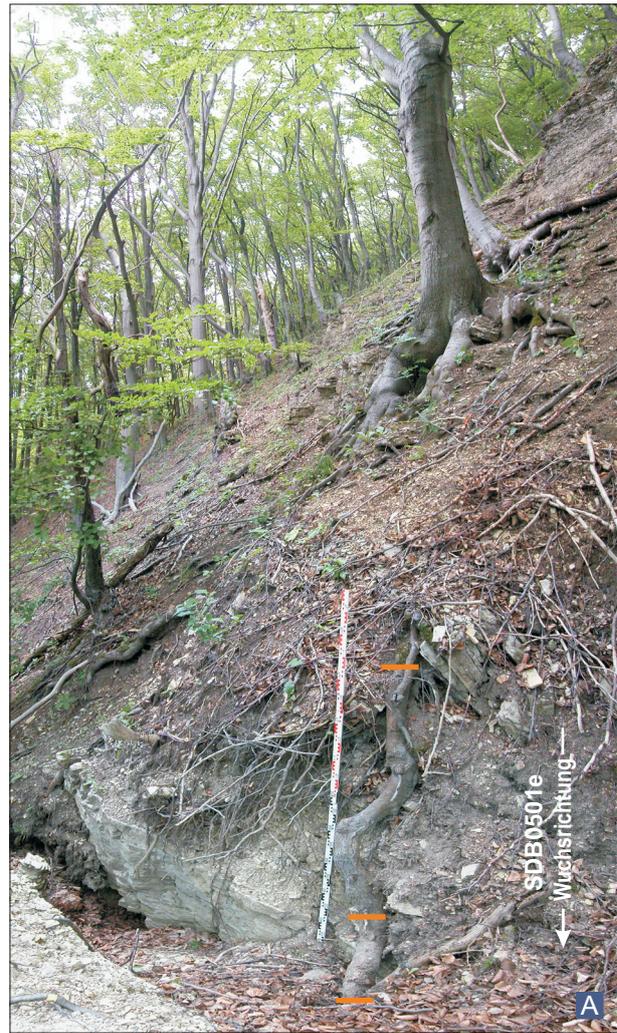


Abb. 6.13: Standort SDB0501 mit Wurzelstrang SDB0501e  
A: Blick von der kleinen Scholle auf die Abrißwand;  
B: Blick in die Spalte.

Die Hangneigung oberhalb der Spalte beträgt  $47^\circ$ , geht talwärts in einen  $53^\circ$  steilen Abfall über und endet mit fast senkrechten Wänden in der Spalte an der Hangoberseite. Unterhalb der Spalte setzt sich nach einer Hangverflachung die Hangneigung mit  $32^\circ$  fort (vgl. Abb. 6.13, B).

Der untere Teil der Wurzel SDB0501e (Abb. 6.13, B, siehe Balken) lag über eine Länge von 35 cm frei. Unterhalb dieses Abschnittes war die Wurzel von Muschelkalkschutt mit Laubabdeckung verschüttet. Oberhalb dieses 35 cm langen Abschnittes wurde Sie teilweise durch Bodensubstrat und Laub bedeckt. Das Foto in Abbildung 6.13, A zeigt den Wurzelverlauf nach der Entfernung der bedeckenden Materialien. Auf Höhe des obersten Balkens (Abb. 6.13, A) wuchs die Wurzel oberflächennah, wobei sie in Teilen von Bodensubstrat bedeckt war.

Für die Untersuchung der Freilegungsreaktion wurde die Wurzel über die gesamte Länge, von der Grenze Muschelkalkschutt/Freilegung bis zum oberflächennah wachsenden baumnahen Wurzelabschnitt, entnommen (vgl. Abb. 6.13, A). Für die folgende Auswertung wurden aus der 154 cm langen Wurzelprobe drei Scheiben herausgetrennt (Abbildung 6.14). Je eine Scheibe aus dem unteren freigelegten Teilstück, dem mittleren Teil und dem Grenzbereich Substratbedeckung/Freilegung.

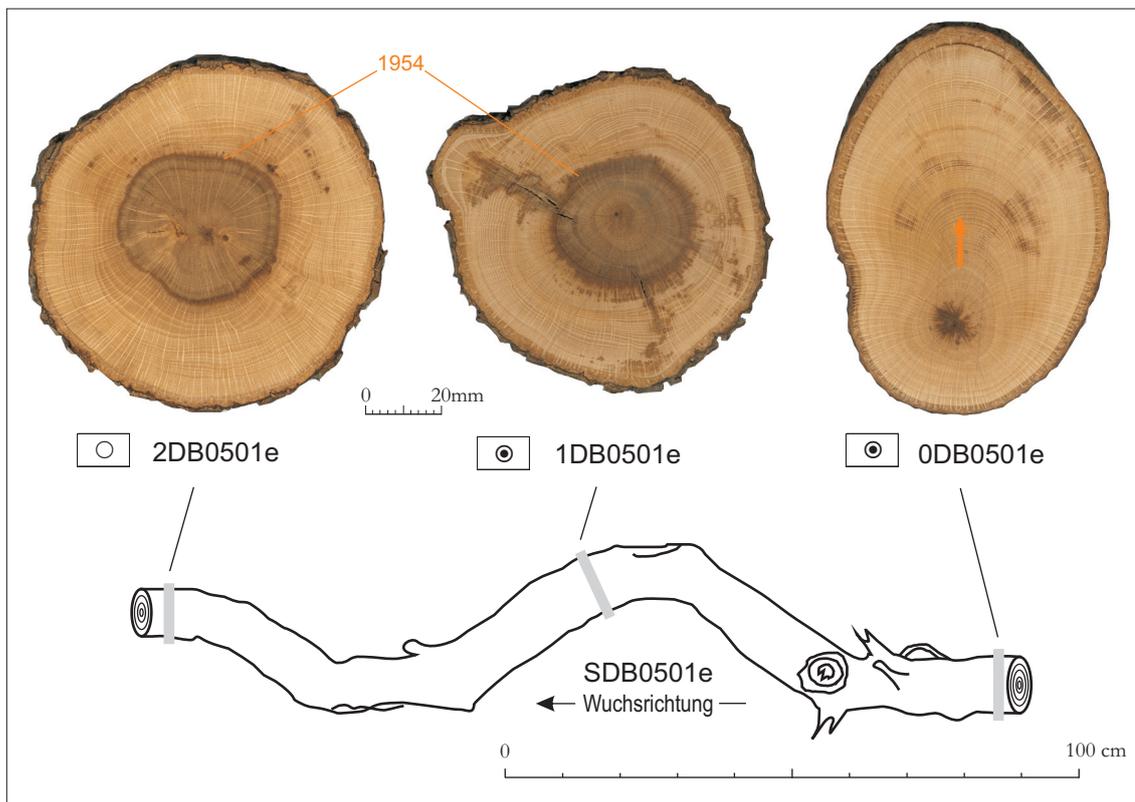


Abb. 6.14: Schematische Darstellung des Wurzelstrangs SDB0501e mit den heraus getrennten Scheiben, Scannbilder der einzelnen Querschnitte, aus dem freigelegten Teil (2DB0501e) und der Grenze Substrat/Freilegung (1DB0501e, 0DB0501e). Das Jahr 1954 markiert die deutliche Grenze der Verthyllung. Im Querschnitt 0DB0501e kennzeichnet der Pfeil ein Einsetzen von Exzentrizitäten in Richtung Wurzeloberseite (Pfeil).

Auf Grund der Gegebenheiten, konnte keine Scheibe derselben Wurzel aus einem nicht freigelegten, ungestörten Bereich entnommen werden. Jedoch lässt die Situation des Wurzelverlaufes und das negativ phototrope Wachstumsverhalten darauf schließen (vgl. Kap. 2.4), dass die Wurzel

vor der Spaltenöffnung die aktuelle Position innerhalb der Spalte eingenommen haben muss. Die makroskopische Auswertung der einzelnen Scheiben ergab ein differenziertes Bild (Abb. 6.14). Die Proben 2DB0501e und 1DB0501e zeigen eine fakultative Verkernung ähnlich der Rotkernbildung im Stamm bei alten Buchen. Allerdings fehlt beiden die wolken- oder zackenförmige Ausbildung des Rotkerns. Sehr deutlich ist jedoch die markante Grenze im Querschnitt von 2DB0501e, zwischen dem verkernten und nicht verkernten Bereichen, zu erkennen. Bei der Probe 1DB0501e ist dieser Übergang weniger deutlich ausgeprägt. Diese fakultative Verkernung fehlt bei Probe 0DB0501e fast vollständig. Die sichtbaren dunkleren Bereiche auf diesem Querschnitt sind die Folge von zu hohem Druck beim Schleifen der Scheibe.

Die deutliche Grenze im Jahrringbild von 2DB0501e, hervorgerufen durch eine Verthyllung (vgl. **Kap. 2.3**) der Gefäße, geht einher mit dem Einsetzen exzentrischen Wachstums und deutlich erkennbaren Jahrringgrenzen, als Folge von eintretenden mechanischen Belastungen ab dem Jahre **1954** (vgl. Abb. 6.14, 2DB0501e). Der komplette innere Teil dieses Wurzelquerschnittes wurde in diesem Zuge durch Kompartimentierung abgeschottet. Dies ist ein deutlicher Hinweis auf eine Verwundung in diesem Wurzelabschnitt.

Eine ähnliche Reaktion zeigt die Scheibe 1DB0501e, allerdings ist in dieser Probe eine weniger deutliche Grenze ausgeprägt, so dass man eher auf eine sekundäre Reaktion dieses mittleren Wurzelabschnittes schließen muss. Dies unterstreicht auch eine kaum auszumachende Zunahme der Jahrringbreiten im Jahr **1954**, als Folge von mechanischen Belastungen (Abb. 6.14, 1DB0501e).

In Probe 1DB0501e ist die Verthyllung vermutlich die Folge einer Verwundung der tiefer liegenden Probe 2DB0501e im Zusammenhang mit der Freilegung des Querschnittes 2DB0501e, oder eines Wurzelabschnittes zwischen beiden Querschnitten (1DB0501e – 2DB0501e).

Eine Verthyllung der Gefäße im zentralen Bereich der Scheibe 0DB0501e ist nicht festzustellen, jedoch zeigen sich deutliche Exzentrizitäten in Richtung der Wurzeloberseite (Abb. 6.14, Querschnitt 0DB0501e, Pfeil). Dies ist die Folge von anhaltenden mechanischen Belastungen durch den Wachstumsverlauf der Wurzel. Diese Probe stammt aus dem Teilstück oberhalb der Spalte (vgl. Abb. 6.14 u. 6.13, A), in dem ein Richtungswechsel der Wurzel nach unten erfolgt. Da dieser Wurzelabschnitt oberflächennah wuchs und teilweise schon frei lag, zeigt sich eine typische Reaktion im Jahrringbild (Exzentrisches Wachstum, mit Reaktionsholz), die auf eine anhaltende Stützfunktionen für diesen Teil der Wurzel schließen lässt.

Für eine klare Differenzierung von einsetzenden Wachstumswechseln, stößt man im makroskopischen Bereich an Grenzen.

Die mikroskopische Auswertung der Dünnschnitte zeigt markante Strukturveränderungen und deutliche Unterschiede der Gefäßgrößen der entsprechenden Wurzelquerschnitte.

In Abbildung 6.15 sind zwei Dünnschnittpräparate aus vergleichbaren Teilen der jeweiligen Wurzelscheiben 0DB0501e (oberflächennah, teilweise freiliegend) und 2DB0501e (freigelegt) gegenübergestellt (vgl. Abb. 6.14).



Abb. 6.15: Gegenüberstellung der Wurzelscheiben 0DB0501e und 2DB0501e (*Fagus sylvatica* L.). Die Vergrößerungen der Dünnschnitte entsprechen den Ausschnitten der jeweiligen Wurzelscheibe. Das Jahr 1954 markiert den Zeitpunkt der Freilegung des Querschnitts 2DB0501e.

In **Sektion A** der Probe 2DB0501e vor **1954** ist die typische Struktur einer nicht freigelegten Wurzel auszumachen. Die einzelnen Jahrringe werden aus einer Reihe von Frühholzgefäßen gebildet, im Spätholz finden sich noch vereinzelt enge Gefäßelemente. Das Grundgewebe unterscheidet sich jedoch von einer Wurzel aus dieser Tiefe deutlich, da die meisten Librifasern und Fasertracheiden (vgl. Abb. 6.4) verdickte Zellwände aufweisen. Dies zeugt von einer mechanischen

Belastung durch die Lage der Wurzel an dieser exponierten Stelle entlang der Abrißwand und in die Spalte hinein. Im Gegensatz zu der Probe 0DB0501e ist dies nicht mit einer Jahrringbreitenvergrößerung verbunden.

Dagegen ist in der **Sektion A** von 0DB0501e ein deutlicherer Jahrringaufbau zu verzeichnen. Verbunden mit verdickten Zellwänden der Fasern im Grundgewebe, zeichnet sich diese Struktur durch eine markante Reihe von Frühholzgefäßen und zahlreiche Spätholzgefäße aus. Die Gefäßgrößen sind jedoch im Vergleich zur Probe 2DB0501e im Durchschnitt kleiner. Von natürlichen Schwankungen abgesehen, entspricht dies einem Wachstum in oberflächennahen Bereichen, bzw. teilweise schon freigelegten Bereichen.

Die oben beschriebenen auffälligen Exzentrizitäten auf der Scheibe 2DB0501e setzen ab dem Jahr **1954** ein. Eine Gegenüberstellung der Präparate 2DB0501e (freigelegt) und 0DB0501e (oberflächennah) zeigt im Jahr **1954** eine markante Veränderung in beiden Proben (vgl. Abb. 6.15). Sehr deutlich wird die abrupte Jahrringbreitenzunahme im Dünnschnitt 2DB0501e in Verbindung mit einem vermehrten Auftreten von Grundgewebezellen. Ein massives Auftreten von Thyllen in der Folgezeit, lässt auf eine Verletzung des Kambiums im Zuge einer mechanischen Belastung schließen (**Sektion B, 2DB0501e**).

In der Probe 0DB0501e fällt auf, dass im Jahr **1954** kaum Frühholzgefäße gebildet wurden. Vermutlich die Folge von einsetzenden mechanischen Belastungen unterhalb der Probe 0DB0501e. Bei näherer Betrachtung des Jahres **1953** im Dünnschnitt 2DB0501e bestätigt sich der vermutete Eindruck, dass schon in diesem Jahr bzw. ab der zweiten Hälfte des Jahres **1953** eine mechanische Beanspruchung dieses Wurzelabschnittes eingesetzt hat.

Die Jahrringbreite des Jahres **1954** ist im Vergleich zu den Vorjahren deutlich größer und die Gefäßgrößen sind reduziert, wobei dies sich in den folgenden Jahren (**Sektion B, 0DB0501e**) auf das Niveau der Vorjahre einpegelt.

Messungen der Gefäßflächen (Abbildung 6.16) von 2DB0501e zeigen ab **1953** bis **1954** eine deutliche Reduktion. In den folgenden Jahren bleiben die Lumenflächen auf diesem anhaltend niedrigen Niveau. Im Vergleich zu den Vorjahren reduziert sich die Gefäßgröße um mehr als 35%. Abgesehen von den negativen Werten (**1912, 1934**, auskeilende Jahrringe) erreichen erst nach **1954** alle Werte dieses niedrige Niveau. Die Reduzierung der Gefäßgröße um mehr als 35%, kann auf Basis der Untersuchungen an künstlich freigelegten Wurzeln, als Reaktion auf eine Freilegung in allen Wurzeln angenommen werden (vgl. **Kapitel 6.1.3**). Somit kann davon ausgegangen werden, dass dieser Teil der Wurzel ab dem Jahre **1954** freigelegt war.

Auf Grund des abrupten Niveauwechsels (vgl. Abb. 6.16; 6.17) der durchschnittlichen Lumenflächen der Gefäße vom nicht freigelegten Zeitraum (vor **1953**) auf das Niveau des freigelegten Zeitraums (nach **1954**), von  $3943 \mu\text{m}^2$  auf  $2491 \mu\text{m}^2$ , muss hier von einer *schnellen* Freilegung der Wurzel ausgegangen werden. Der Boxplot (Abb. 6.17) zeigt den signifikanten Unterschied (vgl. **Anlage 4**) der Werte von 2DB0501e, zwischen dem bedeckten (1883-1953) und freigelegten (1954-2002) Zeitabschnitt.

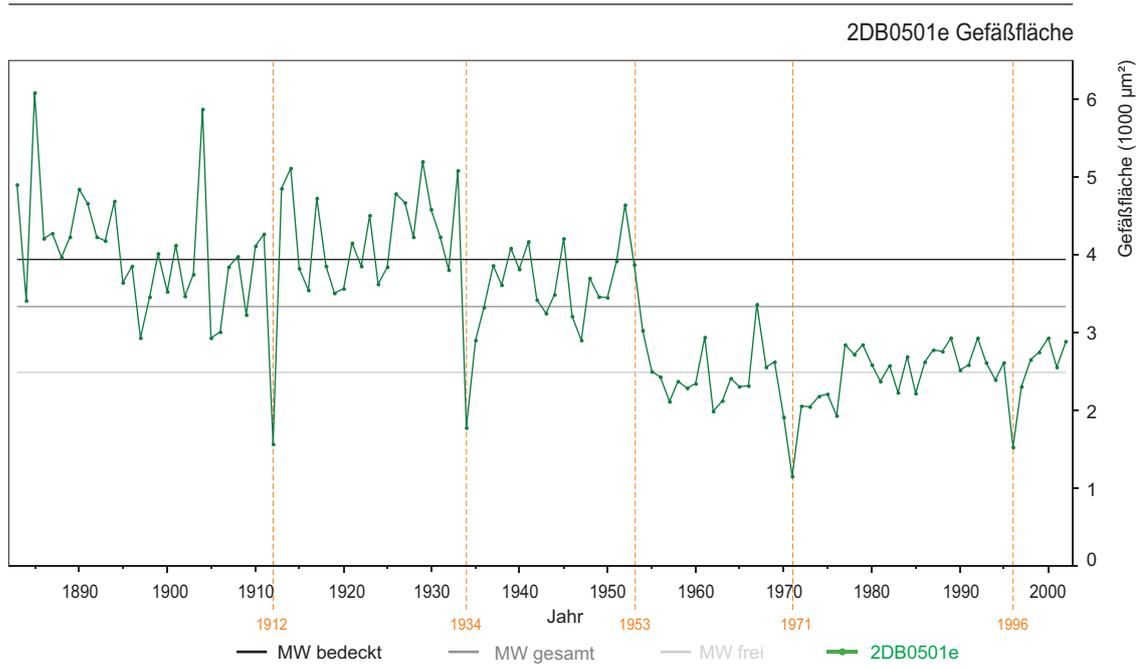


Abb. 6.16: Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 2DB0501e mit einem deutlichen Niveauwechsel ab 1954, mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 2DB0501e (MW frei). Die Jahre 1912 und 1934 markieren auskeilende Jahrringe. Der Einbruch im Jahr 1971 tritt gleichzeitig mit einer deutlichen Exzentrizität im Baum SDB0501 auf. Das Jahr 1996 ist anhand der Referenzkurve als Weiserjahr ermittelt worden.

Der Vergleich beider Kurven (2DB0501e / 0DB0501e; Abbildung 6.18; 6.19) macht deutlich, dass das Teilstück der Probe 0DB0501e (oberhalb der Spalte) im gleichen Zeitraum (vor 1953) oberflächennah bzw. teilweise freigelegt wuchs, da die Gefäßflächen schon auf dem deutlich niedrigeren Niveau lagen.

Die auftretenden negativen Jahre (**1934, 1971, 1996**) bei 2DB0501e (Abb. 6.18) können unterschiedlich eingeordnet werden. **1934** tritt als auskeilender Jahrring in Erscheinung wobei die Reduzierung nur für ein Jahr anhält. Das Auftreten von auskeilenden Jahrringen ist typisch für die heterogene Struktur von bedeckten Wurzelteilen und wurde in den Wurzeln am Standort Krajaer Kopf in zahlreichen Proben aus unterschiedlichen Tiefen, gefunden.

Das Jahr **1996** ist anhand der Referenzkurve als Weiserjahr für diesen Standort ermittelt worden. Da die Wurzel zu diesem Zeitpunkt frei lag, und der Jahrring auch als sehr enger Jahrring in Erscheinung tritt, kann davon ausgegangen werden, dass dieser deutlich negative Wert klimatisch bedingt ist. Jedoch muss bemerkt werden, dass in fast allen untersuchten

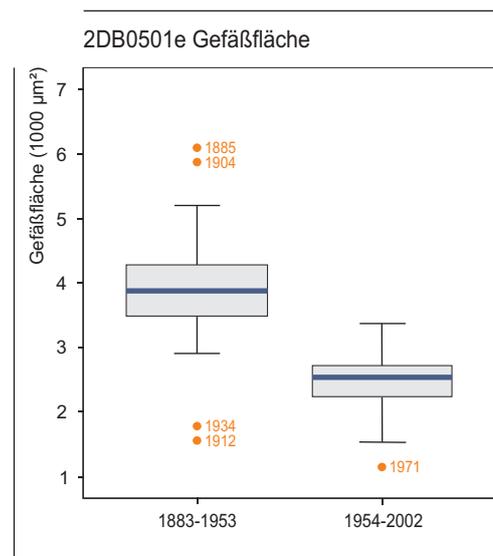


Abb. 6.17: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Gefäßflächenmessung der Wurzelprobe 2DB0501e von bedeckten (1883-1953) und freigelegten (1954-2002) Zeitabschnitten.

Proben die klimatisch bedingten Signale, in den Gefäßgrößen von natürlich freigelegten Wurzeln durch geomorphologische Einflüsse und den damit verbundenen Veränderungen des Makroklimas, überlagert werden.

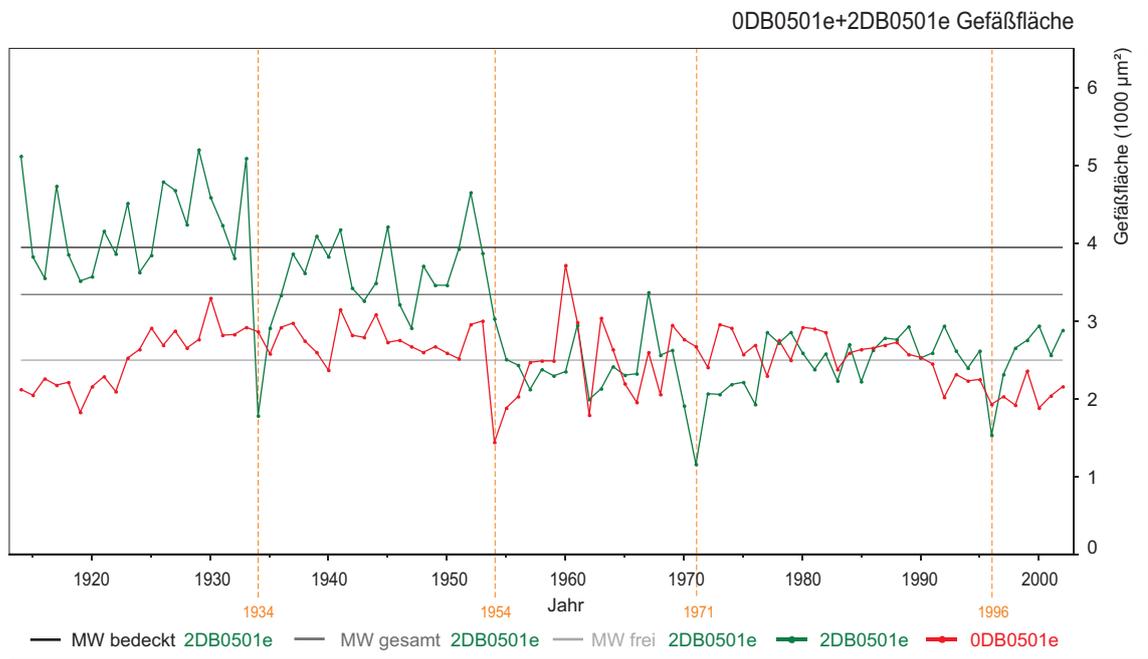


Abb. 6.18: Vergleich der Gefäßflächenmessungen (*Fagus sylvatica* L.) zwischen dem freigelegten Querschnitt 2DB0501e (ab 1954) und dem Querschnitt aus der Übergangszone Substrat/Freilegung 0DB0501e. Der Mittelwert bedeckt (MW bedeckt) bezieht sich auf Kurve 2DB0501e im nicht freigelegten Zeitraum, der Mittelwert gesamt (MW gesamt) entspricht der gesamten Kurve von 2DB0501e und (MW frei) bezieht sich auf die Werte des freigelegten Bereiches dieses Wurzelquerschnitts (2DB0501e).

Die markante Reduzierung im Jahre **1971** im Dünnschnitt 2DB0501e (vgl. Abb. 6.18) tritt gleichzeitig mit einer deutlichen Exzentrizität im Baum SDB0501 auf. Ab **1971** setzt auf dem

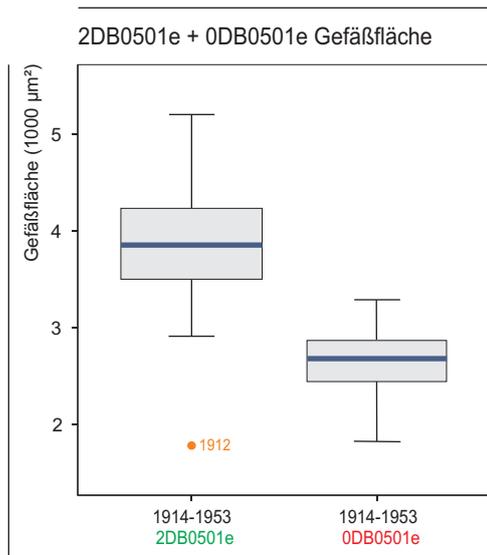


Abb. 6.19: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Querschnitte 2DB0501e und 0DB0501e im selben Zeitraum 1914 bis 1953. Signifikant kleiner sind die Gefäßflächen des Querschnitts 0DB0501e.

Radius SDB0501b eine Jahrringbreitenzunahme ein, mit einer Reduzierung auf dem gegenüberliegenden Radius SDB0501a (vgl. Abbildung 6.20).

Diese Reaktion hält 22 Jahre bis **1993** an. Ab dem Jahre **1994** geht der Verlauf der Kurve auf das Niveau der anderen Radien zurück.

Weitere deutliche Exzentrizitäten finden sich in Zeiträumen vor **1971**. Ab **1874** zeigen die Jahrringbreiten des Radius SDB0501a (rote Kurve) eine anhaltende Reduzierung bis **1918**. Auf der b-Achse des Baumes kommt es im Zeitraum **1874** bis **1905** zu einer deutlichen Jahrringbreitenzunahme.

Die Jahrringbreiten von SDB0501c (Abbildung 6.21) überschreiten im selben Zeitraum die Maximalwerte von SDB0501b (**1874-1893**) aber unterschreiten sie auch (**1894-1905**).

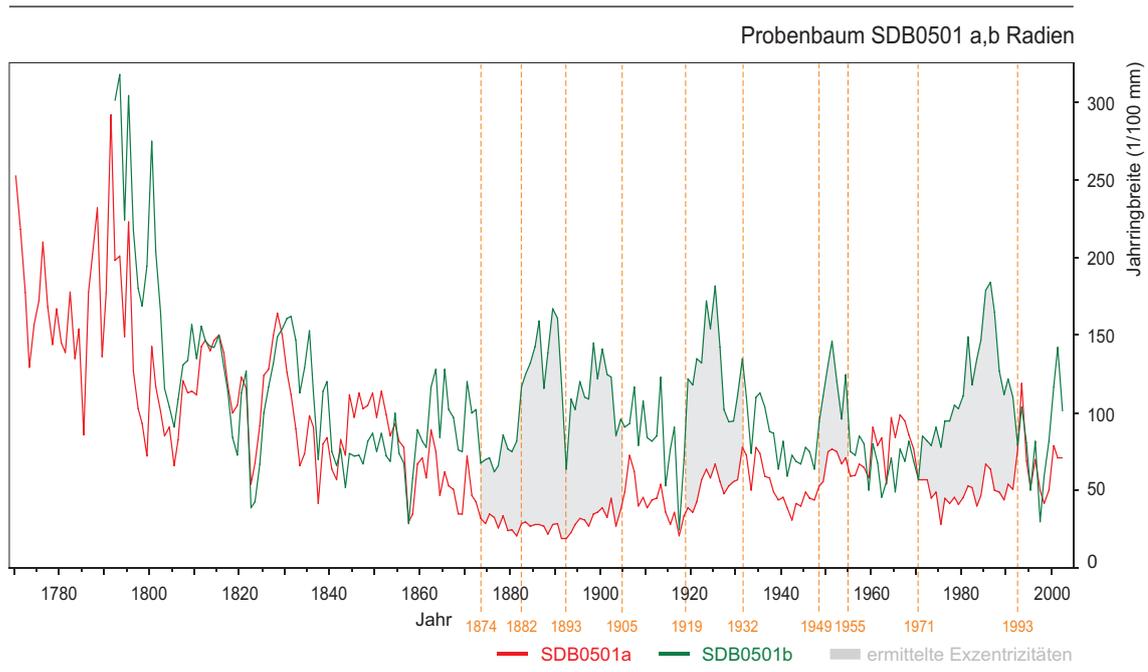


Abb. 6.20: Vergleich der Radien SDB0501a und SDB0501b des Probenbaums SDB0501. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.

Dieser Zeitraum (**1874-1905**) lässt sich in folgende Phasen unterteilen. Von **1874** bis **1881** sind geringe Exzentrizitäten in den Radien b, c und d zu verzeichnen (Abb. 6.21). Ab dem Jahr **1882** ist eine Zunahme der Jahringbreiten auf den Radien SDB0501b und SDB0501c auszumachen. Dieser Ausschlag hält bis **1905** an und ist nur durch das Weiserjahr **1893** unterbrochen. Ab **1919** erfolgt ein nochmaliger Anstieg der bis **1932** anhält. Ein interessanter Niveauwechsel (Abb. 6.21) ist im Jahr **1952** auf dem Radius SDB0501c (blau) zu verzeichnen. Hier fällt der Kurvenverlauf für 9 Jahre, bis **1960** unter das sonst niedrigste Niveau der Kurve SDB0501a (rot).

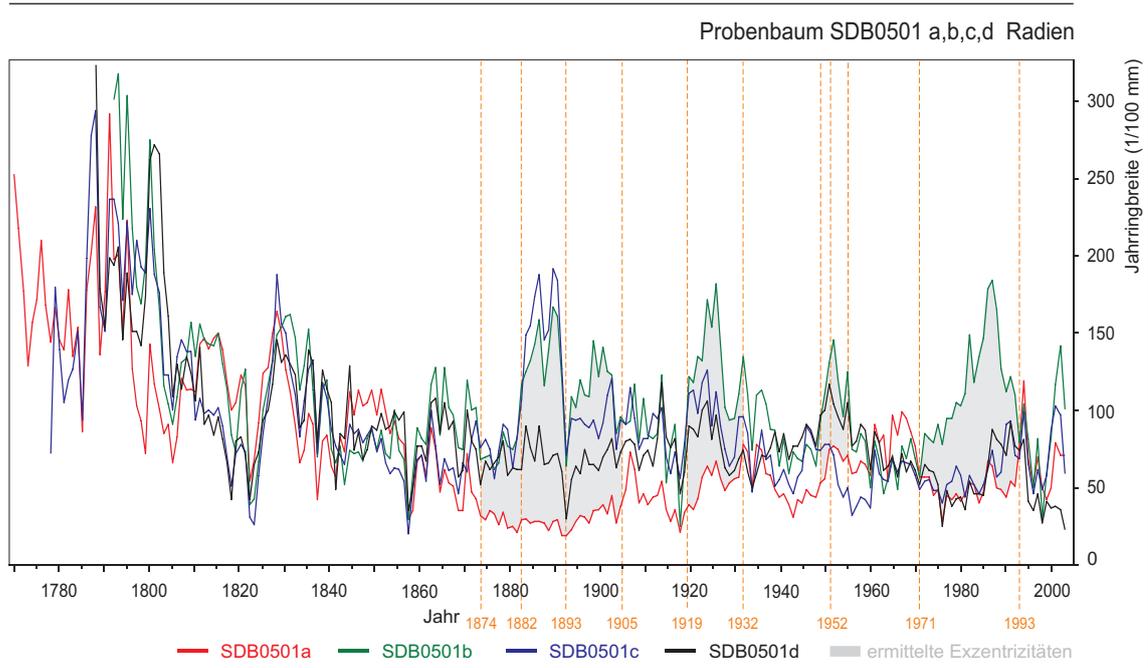


Abb. 6.21: Vergleich der Radien SDB0501a, SDB0501b, SDB0501c und SDB0501d des Probenbaums SDB0501. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.

Die Analyse von Wurzel und Stammdaten ermöglicht die Rekonstruktion der Spaltenöffnung. Anhand der Gefäßflächenmessungen konnte der Freilegungszeitpunkt der Wurzel für das Jahr **1954** festgelegt werden. Der Öffnung der Spalte und der damit verbundenen Freilegung des gemessenen Querschnittes 2DB0501e gingen vorbereitende Phasen voraus. Abgesehen von einer wenig stark ausgebildete Exzentrizität von **1845** bis **1854** (SDB0501a), kommt es ab **1874** zu einer Schrägstellung des Baumes in Richtung a-d-Achse. Der enorme Anstieg der Kurven SDB0501b und SDB0501c ab dem Jahr **1882** lässt auf ein größeres Massenverlagerungsereignis schließen (Abb. 6.21, Tabelle 6.2). Diese Reaktionsholzbildung im Jahr **1882** fällt in den Zeitraum, den JOHNSON 1974a mit ~ **1880** beschreibt und als mit Jahreszahlen belegte Hangbewegung an den Bleicheröder Bergen bei Kraja aufzählt. Ab dem Jahr **1894** verlagert sich die Neigung des Baumes in Richtung a-Achse. Durch die anhaltende Exzentrizität bis **1905**, wird das Ausmaß der Schrägstellung des Baumes SDB0501e deutlich.

Tab. 6.2: Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDB0501.

Zeiträume	SDB0501a	SDB0501b	SDB0501c	SDB0501d
1840-1860	1845-1854			
1861-1880		1874-1880	1874-1880	
1881-1900		1881-1900	1881-1900	
1901-1920		1901-05,1919/20	1901-05,1919/20	
1921-1940		1921-1932	1921-1932	
1941-1960		1949-1955		1949-1955
1961-1980		1971-1980		
1981-2003		1981-1993		

Die Spalte des Standortes SDB0501 hatte sich in diesem Zeitraum aber noch nicht geöffnet, da keine Reduktionen der Gefäßgrößen in der Wurzel SDB0501e zu verzeichnen sind. Jedoch hatte die Wurzel SDB0501e die Position des Querschnitts 2DB0501e im Jahre **1883** eingenommen. Dies ist ein Hinweis auf Kluffbildungen im Untergrund, da nur dann eine Möglichkeit für die Wurzel bestand, senkrecht in die Tiefe zu wachsen.

In der Folge traten weitere geomorphologische Aktivitäten auf, die zu einer Schrägstellung des Baumes SDB0501 in Richtung a-d-Achse führten (**1919-32**), wobei sich eine Tendenz mehr zur a-Achse hin andeutet. Ab dem Jahr **1945** wechselte die Neigung des Baumes in Richtung a-c-Achse. In diesen Zeitraum fällt die rekonstruierte Spaltenöffnung im Jahr **1954** an diesem Standort. Dem Wachstumseinbruch in der Wurzel im Jahr **1971**, folgt im Jahre **1972** ein erneuter Anstieg der Jahrringbreite (Stamm) ausschließlich auf der b-Achse. Dies entspricht einer deutlichen Schrägstellung in Richtung a-Achse, interessanterweise hangparallel. Es ist vermutlich die Folge von weiteren initialen Spaltenöffnungen auf gleicher Höhe am Hang (vgl. **Karte 1, Krajaer Kopf/ Bleicheröder Berge**). Das Maximum der Jahrringbreiten in diesem Zeitabschnitt erreicht

der Probenbaum SDB0501 auf der b-Achse in den Jahren **1986/87 (Abb. 6.21)**. Die genannten Schrägstellungen und Spaltenöffnungen decken sich mit Archivauswertungen und ermittelten Massenverlagerungen von JOHNSON 1974a und 1984a. In diese Zeiträume fallen beschriebene Ereignisse mit folgenden Jahreszahlen: 1954, 1973, 1977, 1981 (vgl. JOHNSON 1974a, 1984a). (vgl. Tab.6.2).

Tab. 6.3: Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität des Untergrundes (Kluftbildung, Spaltenöffnung) am Standort SDB0501 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen (Jahresangabe, Zusammenstellung der einzelnen Stationen vgl. Anlage 5).

Phasen	Abgeleitete geomorphologische Aktivität	Extreme Niederschlagsereignisse
		Stationen: Worbis, Leinefelde, Bleicherode
1845-1854	Phase geringer Bewegung	n.v.
1874-1881	Phase geringer Bewegung	n.v.
1882-1892	Phase starker Bewegung, Kluftbildung	n.v.
1894-1905	Phase geringer Bewegung	1906, 1909
1919-1932	Phase starker Bewegung	1917, 1923, 1926, 1933
1949 -1953	Phase starker Bewegung	1951, 1952
1954	Wurzelfreilegung, Spaltenöffnung	--
1971-1980	Phase starker Bewegung	1969, 1974, 1978, 1976
1981-1993	Phase starker Bewegung	1981, 1983, 1984, 1988
2000-2003	Phase geringer Bewegung	2002

Die Öffnung der Spalte erfolgte im Jahre **1954** und in der Folgezeit öffnet sie sich weiter, vor allem im Zeitraum **1972 bis 1993**. Die aktuelle Breite der Spalte in Höhe der Wurzel SDB0501e beträgt 122 cm. Der Spaltenöffnung gingen mehrere Phasen voraus die in Tabelle 6.3 zusammenfassend dargestellt sind. Der Einfluss von extremen Niederschlagsereignissen auf die unterschiedlichen Phasen der Massenbewegung wird in der Tabelle 6.3 nochmals deutlich.

### 6.3.2 Schnelle und kontinuierliche Freilegung

Die Analyse von auftretenden Strukturveränderungen in freigelegten Wurzeln ist gebunden an eine genaue Beurteilung des Umfeldes der Wurzel und einer entsprechenden Beprobungsstrategie, in Abhängigkeit von dem Wurzelverlauf.

Das nun folgende Beispiel soll aufzeigen, dass in ein und demselben Wurzelstrang, differenzierte Reaktionen auf unterschiedliche Arten einer Freilegung auftreten können.

Am Standort **SDD0503** des Untersuchungsgebietes Vollenborn (Ost) (vgl. Karte, Vollenborn (Ost)) wurde eine freigelegte Wurzel entnommen, die Strukturen einer schnellen aber auch kontinuierlichen Freilegung aufweist (Abbildung 6.22).

Zwischen einer 3 bis 4 m hohen Abrisswand mit Hangneigungen von 32° bis 45° und einer Blockscholle die im oberen Teil als Rücken in die Trauf übergeht, verläuft in Richtung Nord eine Spalte die mit Muschelkalkschutt verfüllt ist.

Eine 50 cm breite und 109 cm lange Depression in der Mitte der Hohlform weist eine Tiefe von 115 cm auf, geht unterirdisch hangparallel in beide Richtungen weiter und wird tiefer. In Richtung Süden bis SSW setzt sich auf der Stufenfläche eine lang gezogene Hohlform mit Spalten und dolinenförmigen Depressionen fort (vgl. Karte 2, Vollenborn (Ost)). An der Hangunterseite der Blockscholle schließt sich eine sekundäre Abrisswand mit Höhen



Abb. 6.22: Standort SDD0503 mit Wurzelstrang SDD0503e (Pfeil).

von 3 bis 5 m an, wobei oberhalb Hangneigungen von 23° bis 35° auftreten. Die wenig geneigte Oberfläche der Blockscholle (5°) fällt Richtung Spalte mit 34° ab und geht in einer konkaven Form in eine Hangneigung von 19° über. In der Abbildung 6.22 (Pfeil) ist der Wachstumsverlauf der Wurzelprobe SDD0503e dargestellt. Die Wurzel tritt im 34° geneigten Hangabschnitt zu Tage und verschwindet im 19° geneigten Geländeteil im Muschelkalk-Schutt. Der mittlere Wurzelteil lag auf einer Länge von 120 cm vollständig frei und hatte keine Bodenberührung mehr (Abbildung 6.23;

6.22, Pfeil). Im Bereich der Probe 1DD0503e betrug die Distanz zwischen Wurzelunterseite und Bodenoberfläche 8,5 cm.

Das entnommene Wurzelstück hat eine Länge von 105 cm. Für die Untersuchung wurden vier Scheiben entnommen. In Abbildung 6.23 sind die einzelnen Querschnitte dargestellt. Die minimale Stammdistanz betrug 160 cm (0DD0503e). Die Lage der Wurzel an der der Spalte zu gewandene Seite der Scholle und die geomorphologischen Gegebenheiten lassen auf eine Freilegung durch kontinuierlichen Bodenabtrag schließen.

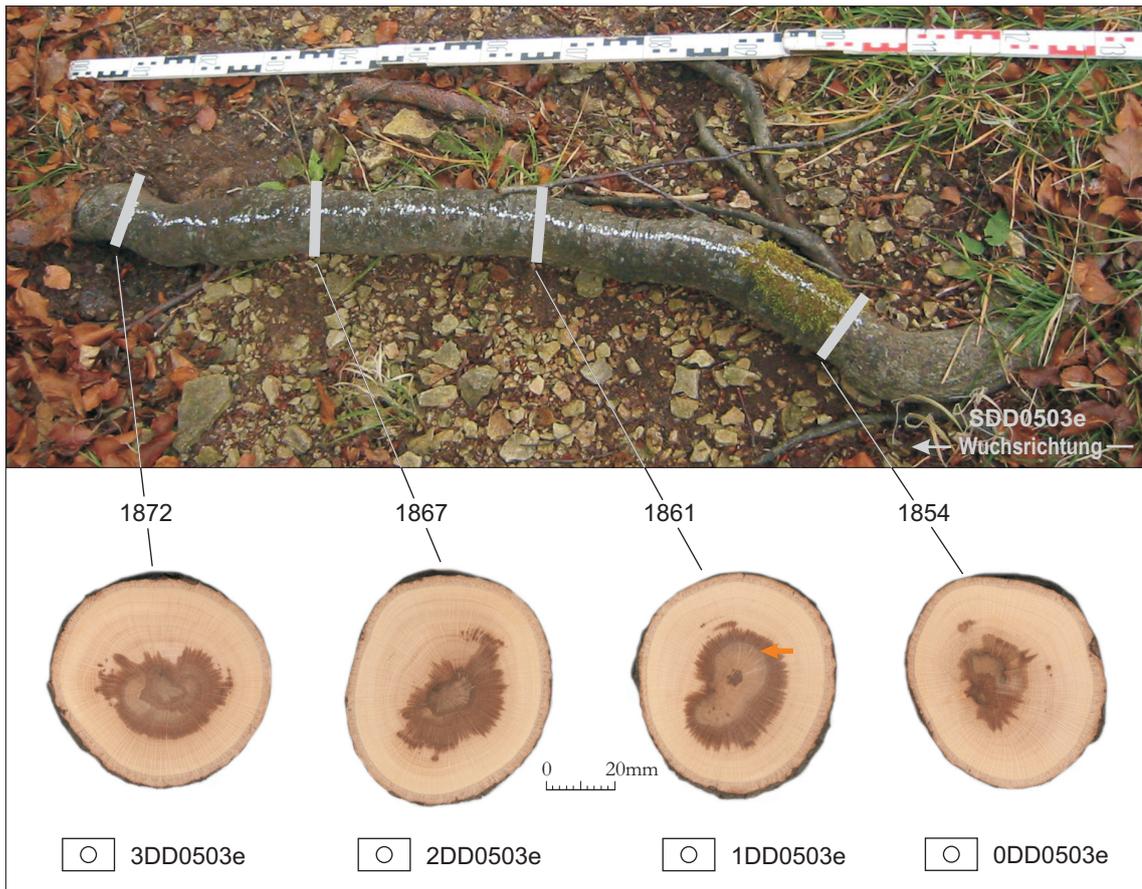


Abb. 6.23: Darstellung des Wurzelstrangs SDD0503e mit entsprechenden Querschnitten der einzelnen Abschnitte. Alle vier Proben (0DD0503e, 1DD0503e, 2DD0503e, 3DD0503e) waren zum Zeitpunkt der Entnahme bereits freigelegt. Im Querschnitt 1DD0503e kennzeichnet der Pfeil eine deutlich sichtbare Grenze innerhalb eines verthyllten Bereiches der Probe.

Alle dargestellten Wurzelscheiben, wobei die Oberseite die Orientierung zur Bodenoberfläche darstellt, weisen Exzentrizitäten auf, die je nach dem beprobten Abschnitt in unterschiedliche Richtungen weisen. Dies lässt auf unterschiedliche mechanische Belastungen der einzelnen Wurzelabschnitte schließen (vgl. Probe 3DD0503e und 1DD0503e). Alle Proben sind in Teilbereichen durch die Bildung von Thyllen geprägt, wobei sich Probe 1DD0503e von allen anderen durch eine deutlich sichtbare Grenze unterscheidet (Abb. 6.23, Pfeil). Die zacken- bis wolkenförmige Ausprägung dieser Strukturen lässt bei fast allen Proben auf eine fakultative Verkernung schließen. Ein genauer Zeitpunkt des Einsetzens der Verthyllung ist bei einem Großteil der Scheiben nicht klar festzustellen. Ob die Kompartimentierung im direkten Zusammenhang mit der Freilegung steht



Abb. 6.24: Dünnschnitt des schnell freigelegten Querschnittes 1DD0503e mit markierten Sektionen A, B und C (rechts). Ausschnitte aus den jeweiligen Sektionen siehe oben. Das Jahr 1927 markiert die Grenze zwischen einer typischen Größenreduzierung der Gefäßflächen infolge einer schnellen Freilegung.

oder erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgte, soll die Betrachtung der Dünnschnitte und Diagramme zeigen.

Im ersten Teil dieser Auswertungen wird anhand des mittleren Querschnitts 1DD0101e (vgl. Abb. 6.23) kurz auf die schnelle Freilegung dieses Wurzelabschnitts eingegangen. Danach folgt eine Überleitung zur Probe 0DD0101e, die aufgrund der Lage im Hang, eine kontinuierliche Freilegung erfahren hat. Den Abschluss bildet die Analyse eines Teilabschnittes (3DD0503e) der Wurzel SDD0503e der sowohl freigelegt, als auch erneut bedeckt wurde.

In Abbildung 6.24 ist ein Ausschnitt aus dem Dünnschnitt 1DD0503e dargestellt. Deutlich werden die durch Thyllen verschlossenen Gefäße innerhalb der markierten Sektion B, in Sektion A und C finden sich keine Einlagerungen bzw. Kompartimentierungen innerhalb der Zellen.

Die Vergrößerungen zeigen entsprechende Ausschnitte aus den drei Sektionen des dargestellten Dünnschnittes. Vergleicht man alle drei vergrößerten Ausschnitte wird eine deutliche Reduktion der Gefäßgrößen, von Sektion A über B zu C (Abb. 6.24), sichtbar. Der Ausschnitt aus der Sektion B zeigt das Jahr **1927** als Grenze zwischen einer typischen Größenreduzierung der Gefäßflächen infolge einer Freilegung. Die Verthyllung der Gefäße, aber auch zahlreicher Fasern im Grundgewebe sind sowohl vor, als auch in den Jahren nach **1927** zu finden. Weiterhin ist eine Zunahme der Zellwanddicke der Libriformfasern bzw. Fasertracheiden zu verzeichnen, jedoch tritt dies in Kombination mit der Kompartimentierung derselben auf. Teilweise ist die Struktur des Grundgewebes so dicht, dass die eingeschlossenen Parenchymzellen nur noch anhand der bläulichen Färbung ihrer Inhaltsstoffe zu erkennen sind.



Der Größenunterschied der Gefäße in Abb. 6.24 von Sektion A und C, spiegelt sich noch deutlicher in der Kurve von 1DD0503e wieder. Abbildung 6.25 zeigt die Reduzierung der Lumenflächen ab dem Jahr **1927** um mehr als 35%. Dieser abrupte Wechsel im Niveau von durchschnittlich 3614  $\mu\text{m}^2$  auf 1494  $\mu\text{m}^2$  zeigt die Reaktion der Wurzel auf eine schnelle Freilegung (Abbildung 6.26).

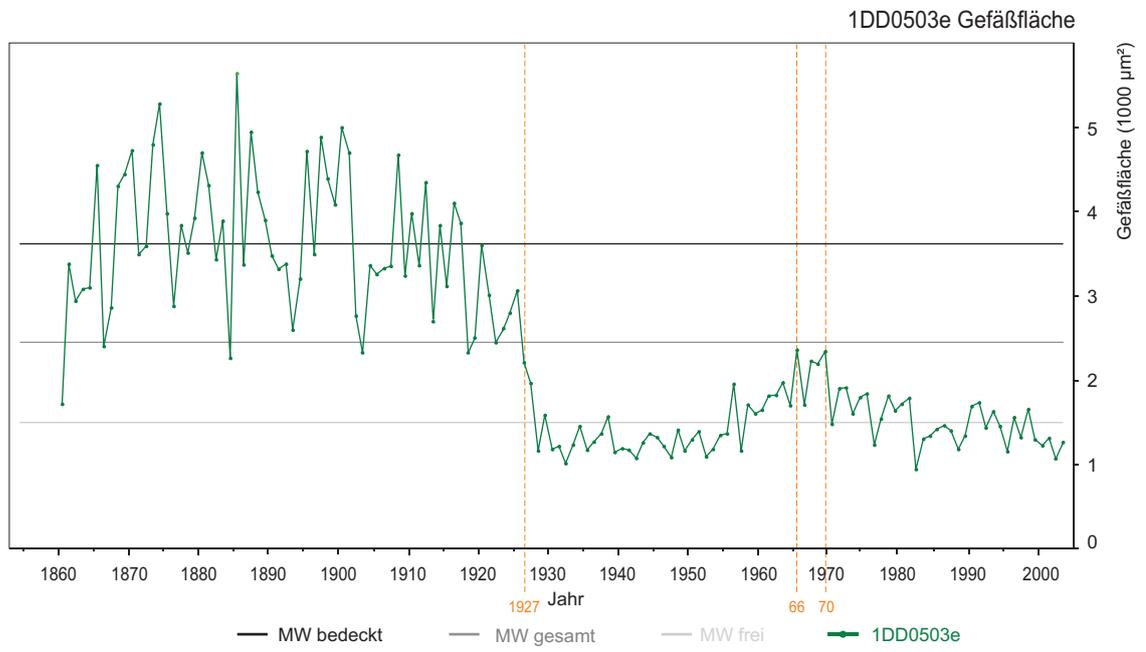


Abb. 6.25: Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 1DD0503e mit einem deutlichen Niveauwechsel ab 1927, mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 1DD0503e (MW frei). Die Jahre 1966 bis 1970 lassen auf eine teilweise Verschüttung in diesem Zeitabschnitt schließen.

Betrachtet man die Kurve von 0DD0503e zeigt sich ein ganz anderes Bild (Abbildung 6.27). Obwohl die Distanz zwischen Probe 0DD0503e und 1DD0503e nur 40 cm beträgt, setzt die Reduktion der Gefäßfläche weniger abrupt und später ein. Im Jahr **1926/27**, im gleichen Zeitraum der Freilegungsreaktion von 1DD0503e (vgl. Abb. 6.27), fällt die Kurve ab, erholt sich aber im darauf folgenden Zeitraum bis **1935**. Wobei sie noch mal ein Maximum von 4413  $\mu\text{m}^2$  (1935) erreicht.

Ab **1939/40** setzt ein Abwärtstrend ein, der nur von dem leicht positiven Ausschlag **1947** unterbrochen wird. In den Jahren **1948 bis 1955** findet eine Abnahme der Lumenfläche der Gefäße statt, die auf einen Oberflächenabtrag schließen lässt.

Das Jahr **1951** liegt noch im Mittelwertbereich der Gesamtwerte 0DD0503e. Die anhaltende Größenreduzierung der Gefäßfläche erreicht 1967 ihr niedrigstes Niveau. Obwohl die Lumenflächen

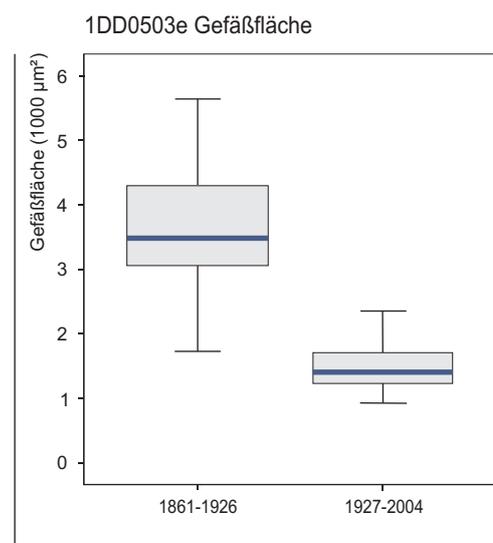


Abb. 6.26: Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 1DD0503e von bedeckten (1861-1926) und freigelegten (1927-2004) Zeitabschnitten.

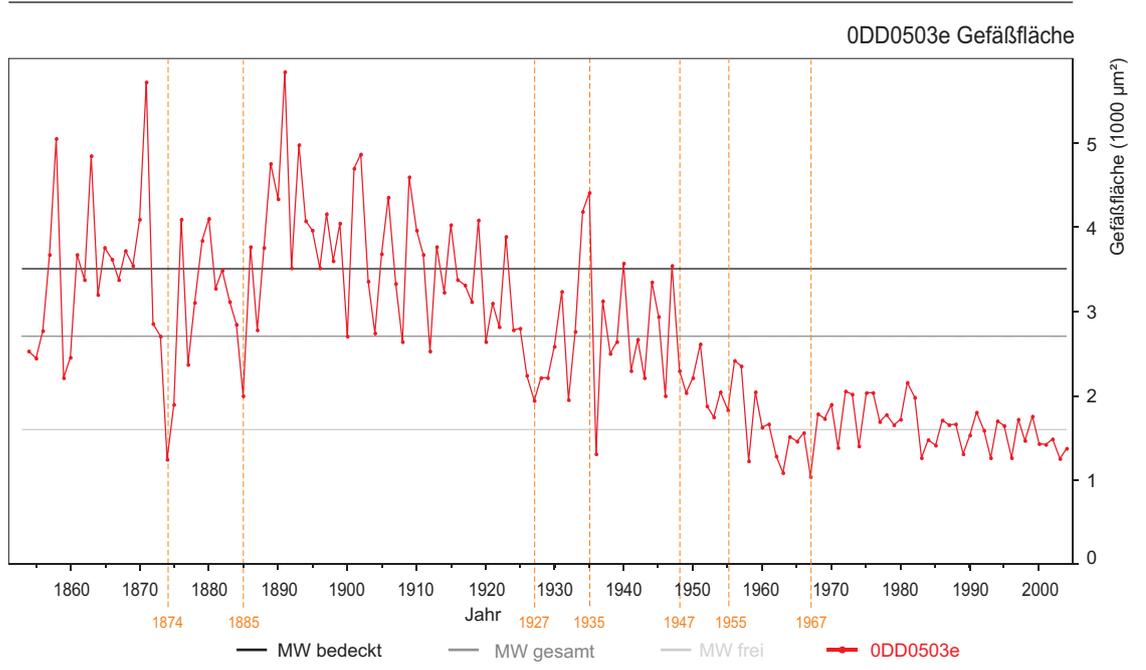


Abb. 6.27: Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von ODD0503e mit einer kontinuierlich ablaufenden Reduktion mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von ODD0503e (MW frei). Ab dem Jahr 1958 ist dieser Querschnitt endgültig freigelegt.

bereits **1953** kurzzeitig um mehr als 35% reduziert sind (vgl. Abb. 6.27), erfolgte die vollständige Freilegung erst ab dem Jahr **1958** (Abbildung 6.28; 6.29, D), da es in den Jahren **1956** bis **1957** zu einem wiederholten kurzzeitigen Anstieg kommt. Markante negative Ausschläge vor **1927** erweisen sich als Bereiche des Dünnschnitts, in dem die jeweiligen Jahrringe (**1874, 1885**) auskeilen

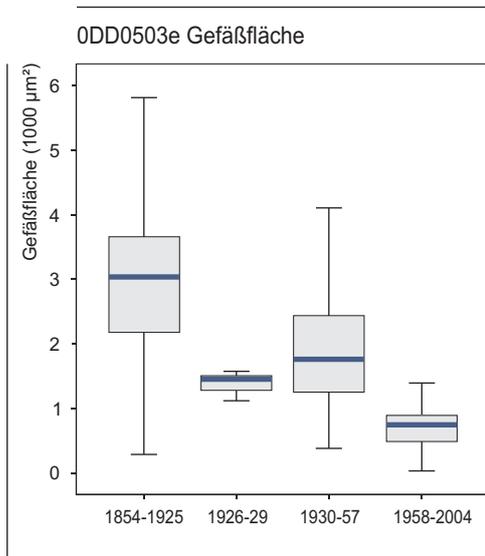


Abb. 6.28: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe ODD0503e, des kontinuierlichen Übergangs von bedeckten (1854-1925) zum endgültig freigelegten (1958-2004) Zeitraum.

(Abb. 6.27). Die Veränderungen der Tiefenlage der Wurzel zeigt sich in der Häufigkeit des Auftretens der Grundgewebezellen, deren Zellwanddicke und Zelllumen. Es tritt ein Wechsel in der Struktur auf, wobei, im Zusammenspiel mit einer Zunahme der Anzahl der Gefäße pro Jahrring (vgl. Abb. 6.29, A, B, C, D) die durchschnittliche Gefäßgröße reduziert wird. Das Jahr der Freilegung von 1DD0503e **1927** bildet in ODD0503e die Grenze zwischen verthyllten Bereichen und der Struktur ohne Kompartimentation (vgl. Abb. 6.29B). Eine mögliche Verbindung zwischen der Verthyllung und Freilegung von ODD0503e kann jedoch nicht hergestellt werden. Allerdings kann die Kompartimentation eine Folge von Verletzungen, des zu diesem Zeitpunkt freigelegten Teils, im Wurzelabschnitt der Probe 1DD0503e, sein.

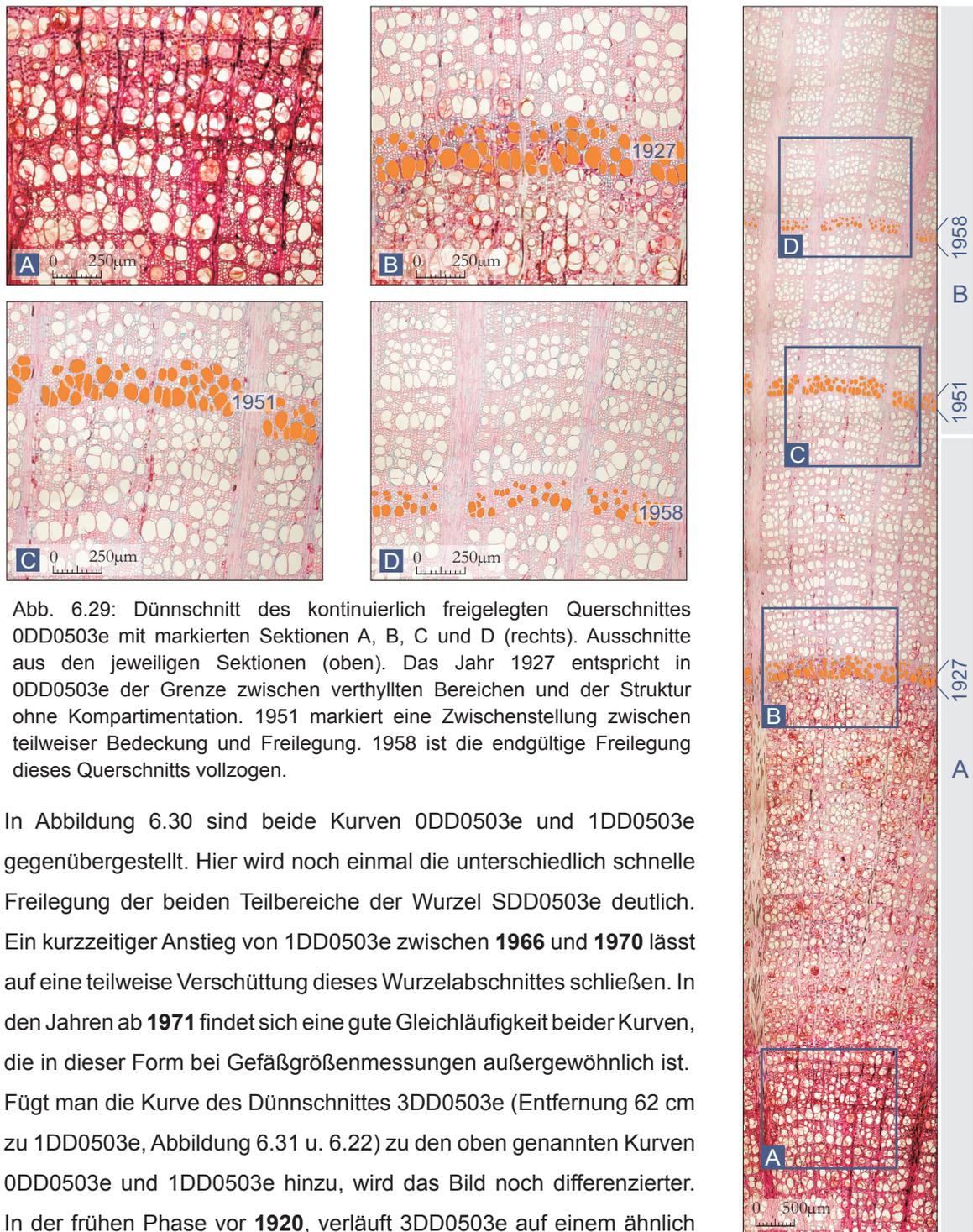


Abb. 6.29: Dünnschnitt des kontinuierlich freigelegten Querschnittes ODD0503e mit markierten Sektionen A, B, C und D (rechts). Ausschnitte aus den jeweiligen Sektionen (oben). Das Jahr 1927 entspricht in ODD0503e der Grenze zwischen verthyllten Bereichen und der Struktur ohne Kompartimentation. 1951 markiert eine Zwischenstellung zwischen teilweiser Bedeckung und Freilegung. 1958 ist die endgültige Freilegung dieses Querschnitts vollzogen.

In Abbildung 6.30 sind beide Kurven ODD0503e und 1DD0503e gegenübergestellt. Hier wird noch einmal die unterschiedlich schnelle Freilegung der beiden Teilbereiche der Wurzel SDD0503e deutlich. Ein kurzzeitiger Anstieg von 1DD0503e zwischen **1966** und **1970** lässt auf eine teilweise Verschüttung dieses Wurzelabschnittes schließen. In den Jahren ab **1971** findet sich eine gute Gleichläufigkeit beider Kurven, die in dieser Form bei Gefäßgrößenmessungen außergewöhnlich ist. Fügt man die Kurve des Dünnschnittes 3DD0503e (Entfernung 62 cm zu 1DD0503e, Abbildung 6.31 u. 6.22) zu den oben genannten Kurven ODD0503e und 1DD0503e hinzu, wird das Bild noch differenzierter. In der frühen Phase vor **1920**, verläuft 3DD0503e auf einem ähnlich hohen Niveau wie die beiden anderen Kurven. **1921** bis **1922** erfolgt ein Einbruch, der sich im Dünnschnitt als markante Zugholzreaktion mit reduzierten Gefäßflächen darstellt. Das rasche Ansteigen der Kurve 3DD0503e bis **1927** zeigt eine nicht anhaltende Freilegung an, bis sie in **1928/29** auf ein mittleres Level, zwischen ODD0503e und 1DD0503e fällt. In den folgenden Jahren (1929-1958) verläuft sie in ähnlicher Weise wie ODD0503e (Abbildung 6.32), bis sie sich **1958** fast in einem Punkt mit beiden anderen Kurven trifft. Ab **1973** liegt sie immer oberhalb der beiden anderen Kurven, bis auf die Jahre **2000** und **2001**. Der Verlauf der Kurve 3DD0503e lässt auf einen Wechsel zwischen Freilegung einer teilweisen Bedeckung und

der endgültigen Freilegung ab **1983** schließen. Abbildung 6.33 zeigt den signifikanten Unterschied zwischen ODD0503e / 1DD0503e und 3DD0503e (**1973-1982**) infolge erneuter Bedeckung von 3DD0503e durch verlagertes Material, bevor es **1983** zur endgültigen Freilegung kommt.

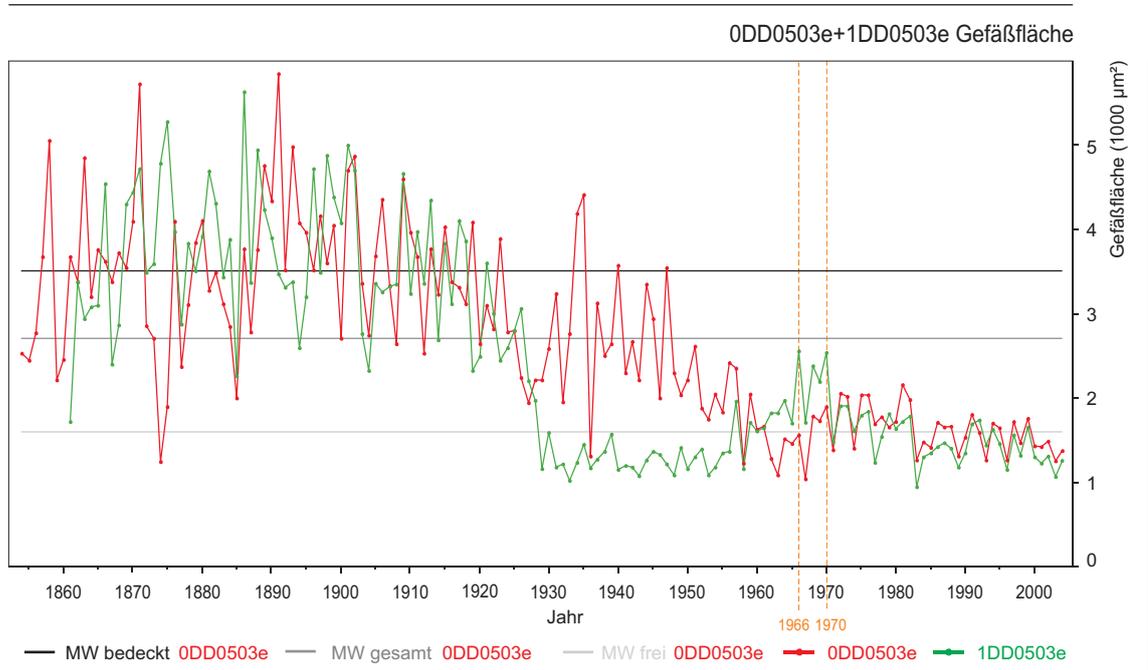


Abb. 6.30: Vergleich der Gefäßflächenmessungen von ODD0503e und 1DD0503e. Deutlich wird die unterschiedlich ablaufende Freilegung der beiden Teilbereiche der Wurzel SDD0503e (schnell - 1DD0503e, kontinuierlich - ODD0503e). Mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve ODD0503e (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für den freigelegten Zeitraum von ODD0503e (MW frei).

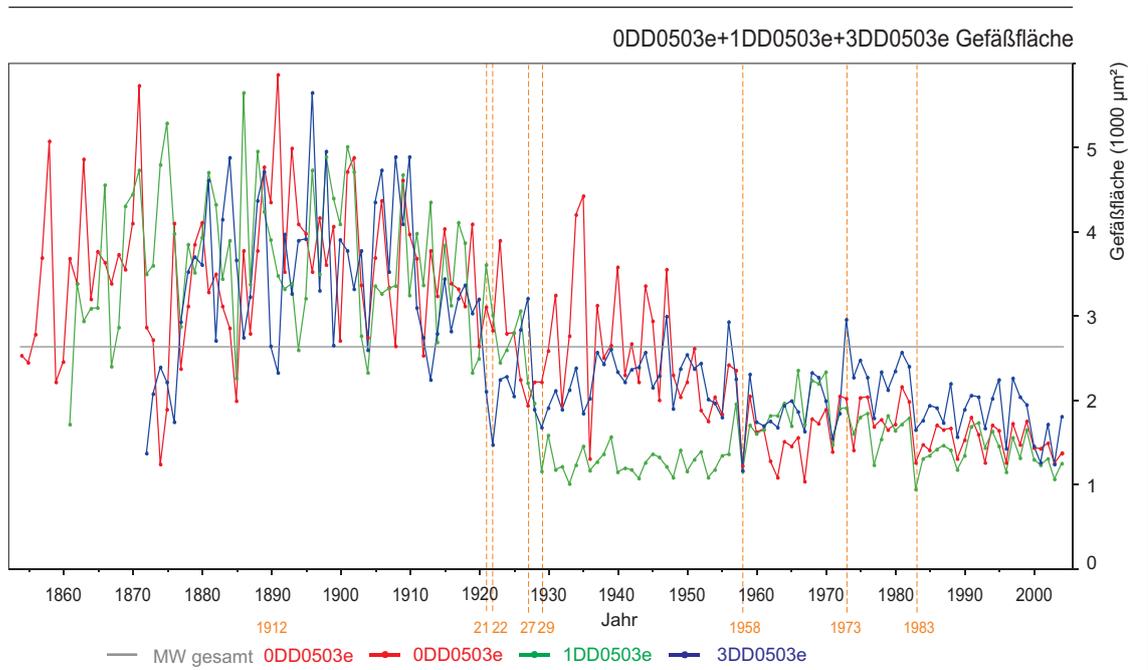


Abb. 6.31: Vergleich der Gefäßflächenmessungen von ODD0503e, 1DD0503e und 3DD0503e. Der Verlauf der Kurve 3DD0503e lässt auf einen Wechsel zwischen Freilegung einer teilweisen Bedeckung und der endgültigen Freilegung ab 1983 schließen.

Die unterschiedlich ablaufende Freilegung der einzelnen Teilbereiche (0DD0503e, 1DD0503e, 3DD0503e) der Wurzel SDD0503e, sind abhängig von der jeweiligen Lage im Hang.

Die erste datierbare Reaktion der Wurzel auf eine Freilegung und damit verbundenen Öffnung der Spalte, findet sich im Dünnschnitt 3DD0501e in den Jahren **1921/22**, in Form einer kurzzeitigen Reduktion der Gefäßgrößen im Zusammenspiel mit Reaktionsholzbildungen. Es folgt die markant schnelle Freilegung des Querschnitts 1DD0503e im Jahre **1927**. Im selben Zeitraum **1926/27** kommt es zu der oben beschriebenen Reduzierung der Gefäßgrößen in 0DD0503e. Da die Wurzel nur im Randbereich der Spalte wuchs, kann bei diesem Ereignis nur von einem stärkeren Erosionsereignis, infolge von Niederschlägen ausgegangen werden. Dieser Prozess wurde durch die erfolgte Spaltenbildung und die dadurch hervorgerufene Versteilung des Hanges verstärkt.

Die Gefäßgrößen des Querschnitts 0DD0503e erreichen im Zeitraum **1926/27** jedoch nicht ganz das Niveau von 1DD0503e. Da der Querschnitt 0DD0503e aus dem Teilstück der Wurzel stammt, welches am oberen Ende der konkaven Form aus dem Hang heraus tritt (Übergang Hangverflachung der Blockscholle zum stärker geneigten Hangabschnitt, Abb. 6.22), ist ein Wechsel aus Abtrag und erneuter Verschüttung zu vermuten.

Infolge der Freilegung von 1DD0503e kommt es in 3DD0503e zu einem Anstieg der Gefäßflächen auf Grund der Verschüttung durch verlagertes Material.

Die endgültige Freilegung von 0DD0503e erfolgte im Jahr **1958** und von 3DD0503e im Jahr **1983** (Tabelle 6.4). Obwohl die Gefäßgrößenreduktion und somit die Freilegung von 1DD0503e schon ab **1927** einsetzte, gab es zwischenzeitlich eine Phase der erneuten Bedeckung mit verlagertem Bodenmaterial (Abb. 6.25, **1966-70**).

An dem dargestellten Beispiel wird das Wechselspiel von Öffnung–Abtrag–Verschüttung–Wiederfreilegung deutlich. Verstärkt wird der Prozess durch die konsequent verlaufende

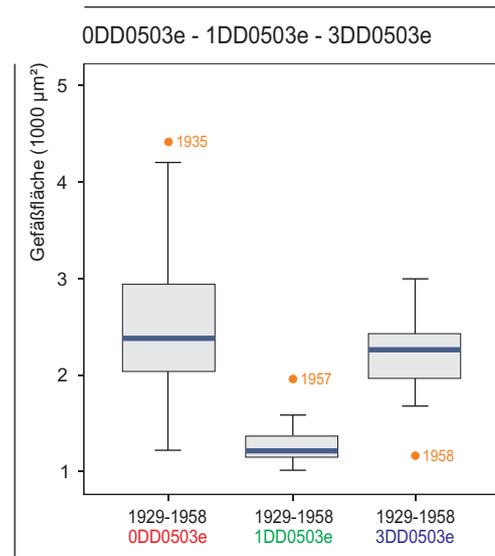


Abb. 6.32: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben 0DD0503e, 1DD0503e und 3DD0503e im selben Zeitraum von 1929 bis 1958.

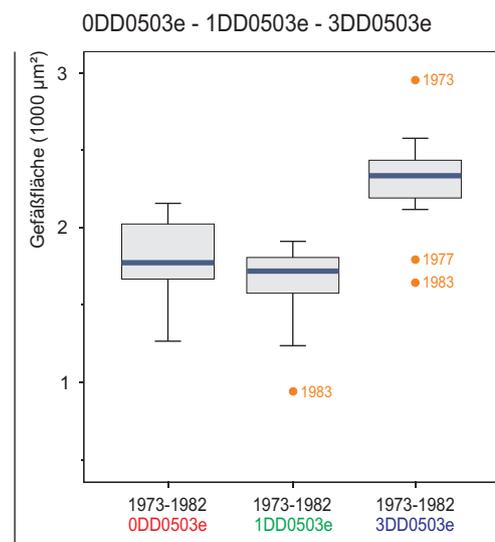


Abb. 6.33: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben 0DD0503e, 1DD0503e und 3DD0503e im selben Zeitraum 1973 bis 1982.

Wuchsrichtung der Wurzel, entsprechend der Hangneigung. Wobei die schnelle und früh erfolgte Freilegung des Querschnittes 1DD0503e im Vergleich zur Probe 0DD0503e durch die Krümmung der Wurzel begünstigt wurde (Abb. 6.22). Die unterschiedlichen Phasen von Freilegung und erneuter Bedeckung der unterschiedlichen Wurzelabschnitte sind zusammenfassend in Tabelle 6.4 dargestellt. Gerade die hier dargestellte, differenziert abgelaufene Freilegung wird durch ein erhöhtes Niederschlagsaufkommen beeinflusst, welches sich in Tabelle 6.4 widerspiegelt.

Tab. 6.4: Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDD0503 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen (Jahresangabe, Zusammenstellung der einzelnen Stationen vgl. Anlage 5).

<b>Phasen</b>	<b>Abgeleitete geomorphologische Aktivität</b>	<b>Extreme Niederschlagsereignisse</b>
		Stationen: Keula, Leinefelde
1921-1922	Spaltenöffnung, kurzzeitige Freilegung von 3DD0503e	1922, 1923
1926-1927	weitere Öffnung, starke Erosion, Freilegung des Querschnitts 1DD0503e	1926, 1927
1958	geringe Erosion, Freilegung des Querschnitts 0DD0503e	--
1966-1970	teilweise Bedeckung von 1DD0503e	1967
1973-1982	teilweise Bedeckung von 3DD0503e	1974, 1977, 1978
1983	erneute Freilegung von 3DD0503e	1983

### 6.3.3 Phasenweise Freilegung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden schnelle und kontinuierliche Freilegungen näher beleuchtet. Im nun folgenden Kapitel wird eine phasenweise ablaufende Freilegung Gegenstand der Untersuchung sein. Aber auch eine vermutete Wiederbedeckung, nach einer zeitweisen Freilegung eines Wurzelabschnittes, soll betrachtet werden.

Am Standort SDD0101e Dün/Ritterholz (vgl. Karte 4, Ritterholz (Dün)) wurde eine 2 m lange, sich in zwei Stränge aufteilende Wurzel beprobt. Die vorgefundene Situation ist in Abbildung 6.34 dargestellt.

Das entnommene Wurzelstück überspannte eine Spalte am Rande des Massenverlagerungsgebietes im Ritterholz (Dün). Wie aus der Karte zu entnehmen ist, befinden sich initiale Spalten auf der Stufenfläche, unterhalb derer sich nach einer Hangneigung von 29° bis 33° eine hangparallele Spalte öffnet. Die Länge der Spalte beträgt 4,55 m, sie hat in Höhe der Wurzel eine Breite von 1,92 m und eine Tiefe von 1,15 m bis 1,45 m. Die Tiefe der Hohlform ist vermutlich größer, da sowohl die Spalte, als auch die in Richtung NO verlaufende Tiefenlinie mit Muschelkalkschutt verfüllt ist.

Auf der Grundlage des Wachstumsverhaltens, welches durch verschiedene Tropismen gesteuert wird (vgl. Kap. 2.4), kann davon ausgegangen werden, dass die Spalte nicht älter ist als die Wurzel. Das Maximalalter der Spalte wurde anhand der

Altersstruktur der Wurzel bestimmt. Das Wachstum der Wurzel erfolgte von der Scholle mit dem Probenbaum SDD0101 (Abb. 6.34, rechte Seite) in Richtung Abrisswand (linke Seite, Abb. 6.34). Auf Grund des Längenwachstums der Wurzel weisen alle Proben entlang des Wurzelstrangs unterschiedliche Wuchsalter auf. So nahm die Probe 0DD0101e (Entfernung zum Stamm 1,68 m) bereits im Jahr **1845** ihre heutige Position ein und im weiteren Verlauf des Wurzelwachstums erreichte die Wurzelspitze die Position der Probe 5DD0101e im Jahr **1863** bzw. 4DD0101f im Jahr **1870** (Abbildung 6.35).



Abb. 6.34: Standort SDD0101 mit Wurzelstrang SDD0101e+f (Pfeil).

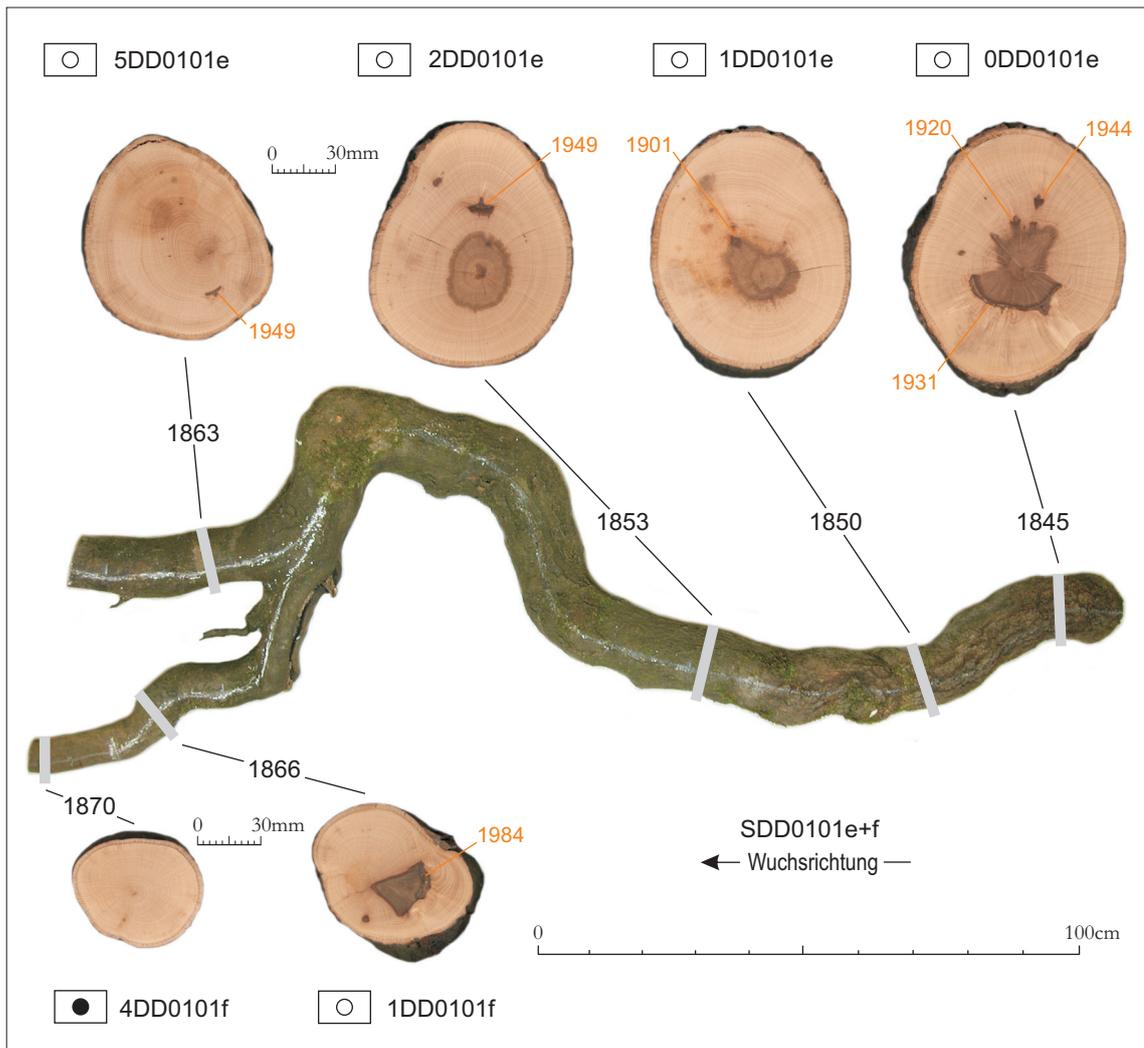


Abb. 6.35: Foto der Wurzelprobe SDD0101e+f. Die weißen Kreidestriche markieren die Oberseite der Wurzel. Der Wurzelstrang teilt sich links in zwei Stränge auf. Der Obere ist die Fortführung von Strang (e) und der Untere hat die neue Bezeichnung (f). Die Wurzelscheiben entsprechen den angezeigten Querschnitten aus dem freigelegten Teil (0DD0101e, 1DD0101e, 2DD0101e, 5DD0101e, 1DD0101f) und dem nicht freigelegten Teil (4DD0101f) der Wurzel. Das jeweilige Alter der einzelnen Querschnitte ist zwischen den Strichen angegeben. Mit Jahreszahlen (orange) sind datierte Verletzungen markiert.

Alle dargestellten Wurzelscheiben weisen Verletzungen auf und die damit verbundenen Reaktionen, Kompartimentation und Überwallung der entsprechenden Bereiche. Die Lage auf den Querschnitten der einzelnen Wurzelscheiben ist sehr unterschiedlich. In Wuchsrichtung betrachtet finden sich überwallte Wunden unten (0DD0101e), oben leicht rechts (1DD0101e), oben (2DD0101e), unten links (5DD0101e) und links bei 1DD0101f (vgl. Abb. 6.35, Pfeile mit Jahreszahl).

In ihren Ausprägungen sind diese Merkmale unterschiedlich stark vorzufinden. Bei 0DD0101e machte die Verletzung ca. 5,5 cm des damaligen Umfangs von 15 cm aus. Der Beginn der Überwallung erfolgte im Jahr **1931**, kleinere Verletzungen sind im selben Querschnitt in den Jahren **1920** und **1944** auszumachen (vgl. Abb. 6.35). In folgenden Proben sind noch weitere überwallte Wunden datierbar: 1DD0101e (**1901**), 2DD0101e (**1949**), 5DD0101e (**1949**). In der Wurzelscheibe 1DD0101f des Stranges f (vgl. Abb. 6.35) ist wiederum eine deutlichere Verwundung im Jahre **1984** zu finden. Die Wurzelprobe 4DD0101f weist keine Verletzungen auf.

Die ermittelten überwallten Wunden sind mögliche Hinweise auf Bewegungen des Untergrundes. Je nach Lage entstehen sie durch Reibung an Steinen oder dem Untergrund bei einsetzender Spaltenöffnung. Sie können aber auch die Folge von Steinschlag sein. Somit können die Verletzungen sowohl unter Bedeckung erfolgen, z.B. Verletzung durch Reibung an Steinen oder nach der Freilegung, durch herabstürzendes Material.

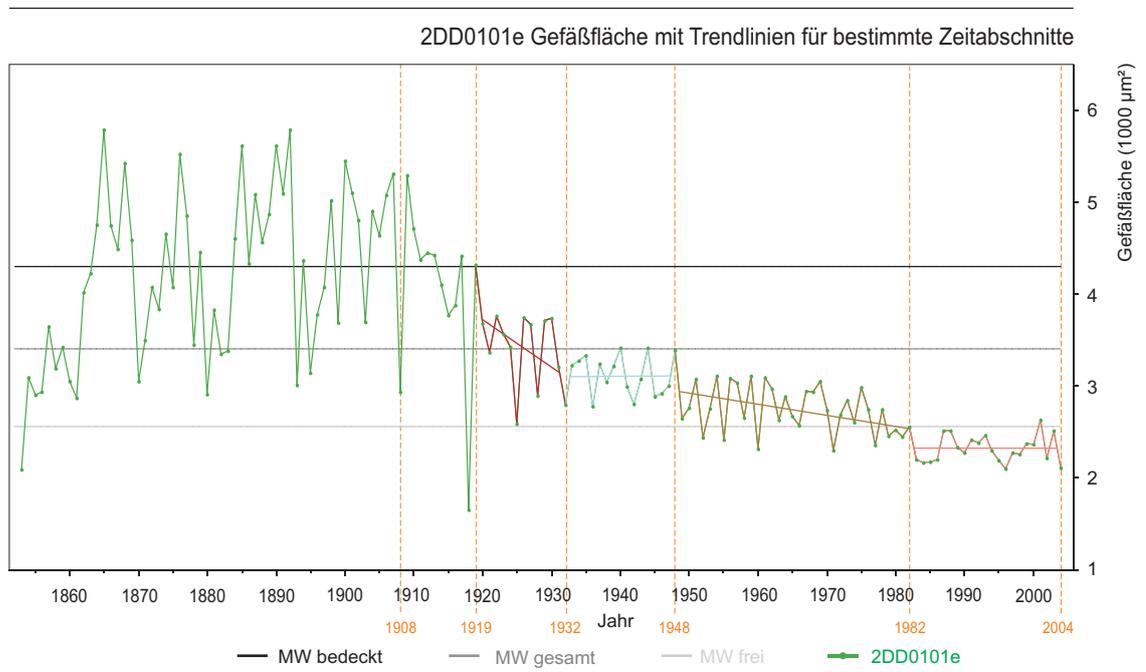


Abb. 6.36: Gefäßfläche von Dünnschnitt 2DD0101e mit Trendlinien für Phasen der Freilegung dieses Wurzelabschnittes. Dargestellt sind weiterhin die Mittelwerte (MW) für den Zeitraum als die Wurzel nicht frei lag (MW bedeckt), der Mittelwert der gesamten Kurve (MW gesamt) und der Mittelwert des freigelegten Zeitabschnittes (MW frei). Die einzelnen Phasen sind unterschiedlich farbig hervorgehoben und mit einer Trendlinie für die entsprechenden Kurvenverlauf versehen.

Die nun folgende Analyse der Gefäßflächen ermöglicht unter anderem die Verifizierung, ob die Verletzungen erfolgten, während die Wurzel innerhalb des Substrates wuchs, oder erst nach einer teilweisen Freilegung bzw. vollständigen Freilegung.

In Abbildung 6.36 sind die Gefäßflächenmessungen des Querschnittes 2DD0101e dargestellt. Dieser Teilbereich der Wurzel SDD0101e ist 246 cm vom Stammanlauf entfernt. Der Querschnitt 2DD0101e liegt zwischen 1DD0101e (Distanz 41 cm) und 5DD0101e Distanz (102 cm) im freigelegten Teil des Wurzelstrangs SDD0101e (Abbildung 6.35).

Das Wachstum der Wurzel vor dem Jahr **1911** zeigt vereinzelt Einbrüche, jedoch kehren die Werte immer wieder auf das Niveau der Vorjahre zurück. **1908** und **1918** sind als auskeilende Jahrringe mit sehr kleinen Gefäßen im Jahrringbild zu finden. Ab **1912** zeichnet sich eine Reduzierung der Gefäßgrößen ab, ein deutlicher Abwärtstrend setzt jedoch erst ab **1919** ein.

Ab diesen Zeitpunkt kristallisieren sich vier Phasen heraus (Abbildung 6.37). Von **1919** bis **1932** ist eine Abnahme der Gefäßgröße und damit ein Bodenabtrag zu verzeichnen. Von **1933** bis **1948** stagniert die Abnahme. Die durchschnittlichen Werte bleiben, von kleinen Schwankungen abgesehen, auf einem gleichen Niveau. Ab **1949/50** ist ein weiterer Niveauwechsel erfolgt, der

bis **1980/81** anhält. Ab **1983** ist dieser Wurzelteil definitiv freigelegt.

Ein möglicher Einfluss durch den vorgefundenen intensiven Bewuchs der Wurzel mit Moosen kann nicht ausgeschlossen werden. Vermutlich kam es zu einer Pufferung der direkten Einwirkungen von exogenen Einflüssen, u.a. durch Sonneneinstrahlung und der damit verbundenen Trockenheit (Abbildung 6.38). Dies hatte vermutlich eine Änderung des Mikroklimas, vor allem in den Wurzelabschnitten mit den Proben 1DD0101e und 2DD0101e, zur Folge. Somit erfolgte die Reduzierung der Gefäßgrößen deutlich langsamer und mit einer weniger ausgeprägten Intensität, als an anderen Standorten der untersuchten Gebiete. Auf Grund dieser Tatsache kann eine Freilegung ab 1949 nicht ausgeschlossen werden. Dieser mögliche Zeitpunkt deckt sich mit der ermittelten Verletzung im Querschnitt 2DD0101e.

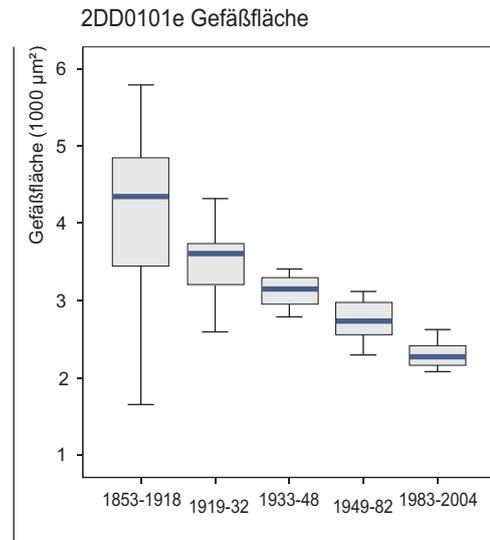


Abb. 6.37: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 2DD0101e, für vier ermittelte Phasen im Zuge der Freilegung ab 1919.



Abb. 6.38: Wurzelstrang SDD0101e+f. Deutlich ist die Moosbedeckung im linken Teil der Wurzel SDD0101e+f zu erkennen.

In Abbildung 6.39 (B) 2DD0101e wird der Wechsel von **1919** zu **1921** noch einmal deutlich. Nach **1920** setzt ein Strukturwandel ein, der sich in deutlicher ausgebildeten Jahrringen mit einer großen Anzahl an Spätholzgefäßen zeigt. In den Jahren vor **1917** ist ein Auftreten von Thyllen zu verzeichnen. Deutlich wird jedoch auch hier, dass die Abnahme der Gefäßgrößen nicht im ausreichenden Maße geschieht, wie für eine komplette Freilegung üblich. Bei dieser geringeren

Größenreduzierung kann noch von einer Bedeckung der Wurzel in diesem Abschnitt ausgegangen werden. In Abbildung 6.39 (A) ist ein Ausschnitt aus dem Dünnschnitt der Wurzelscheibe 5DD0101e dargestellt, der im selben Zeitraum **1919** bis **1922** eine deutlichere Reduzierung in den Lumenflächen der Gefäße vollzieht, dies zeigt sich auch in der Kurve 5DD0101e in Abbildung 6.40. Die erhöhte Amplitude dieser Gefäßgrößenreduktion und ein auf einem niedrigeren Niveau fortsetzender Verlauf der Kurve sprechen für eine Freilegung dieses Teilstücks der Wurzel. Ab **1933** bzw. **1939** nehmen die Gefäßgrößen stetig zu, so dass davon ausgegangen werden muss, dass dieser Wurzelabschnitt durch Erosion eine erneute partielle Bedeckung erfahren hat. Die Nähe zur Abrisswand begünstigt die Möglichkeit einer Abdeckung durch verlagertes Material vom Hang oberhalb der Spalte (Hangneigung 29°, vgl. Abb. 6.34 u. 6.35).

Die ermittelten Werte lassen auf eine Bedeckung bis **1983** schließen, wobei zwischenzeitliche Schwankungen (**1958-1965**) einen Wechsel der Mächtigkeiten anzeigen. Ab **1984** ist der Querschnitt 5DD0101e wieder freigelegt (Abbildung 6.41).

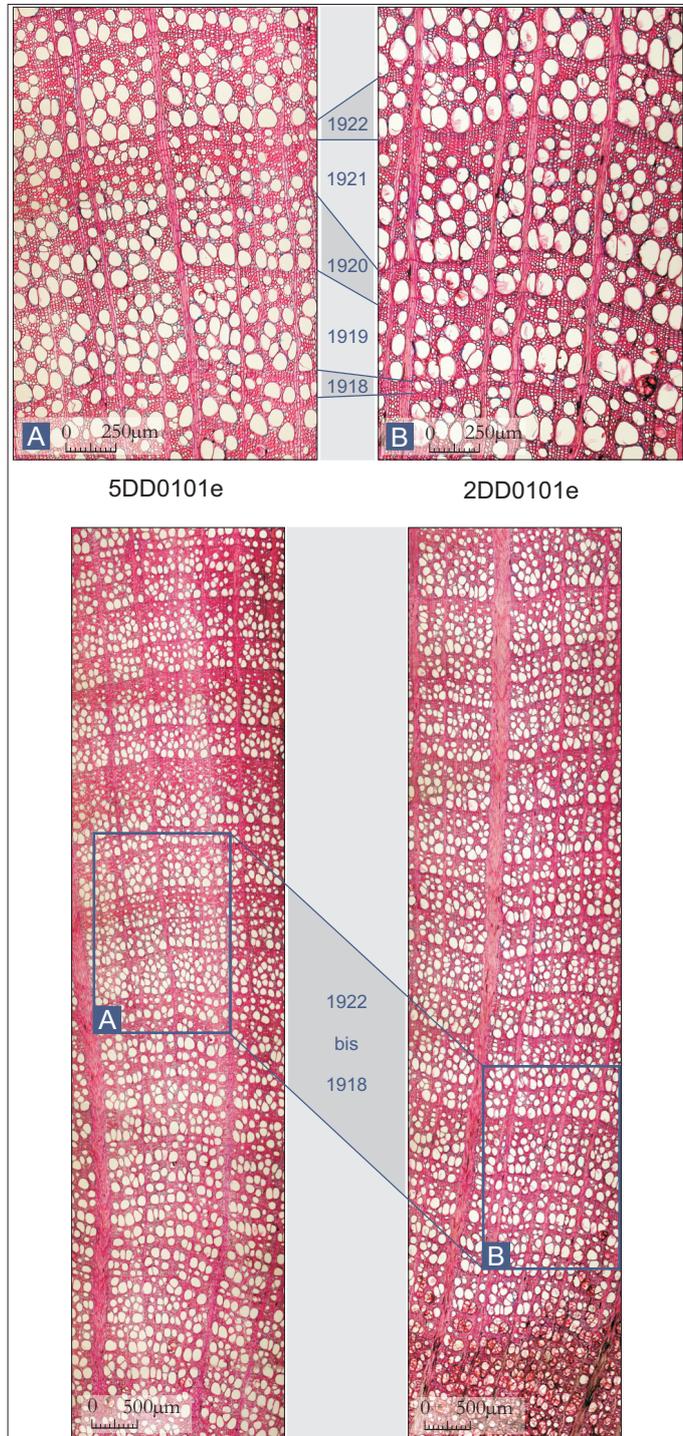


Abb. 6.39: Gegenübergestellt sind die zwei Dünnschnitte 2DD0101e und 5DD0101e. Eine Reduzierung der Gefäßgrößen kann im Dünnschnitt 5DD0101e (A) in den Jahren 1919 bis 1922 festgestellt werden. Die jeweiligen Ausschnitte (A und B) zeigen die vergleichbaren Jahre detaillierter.

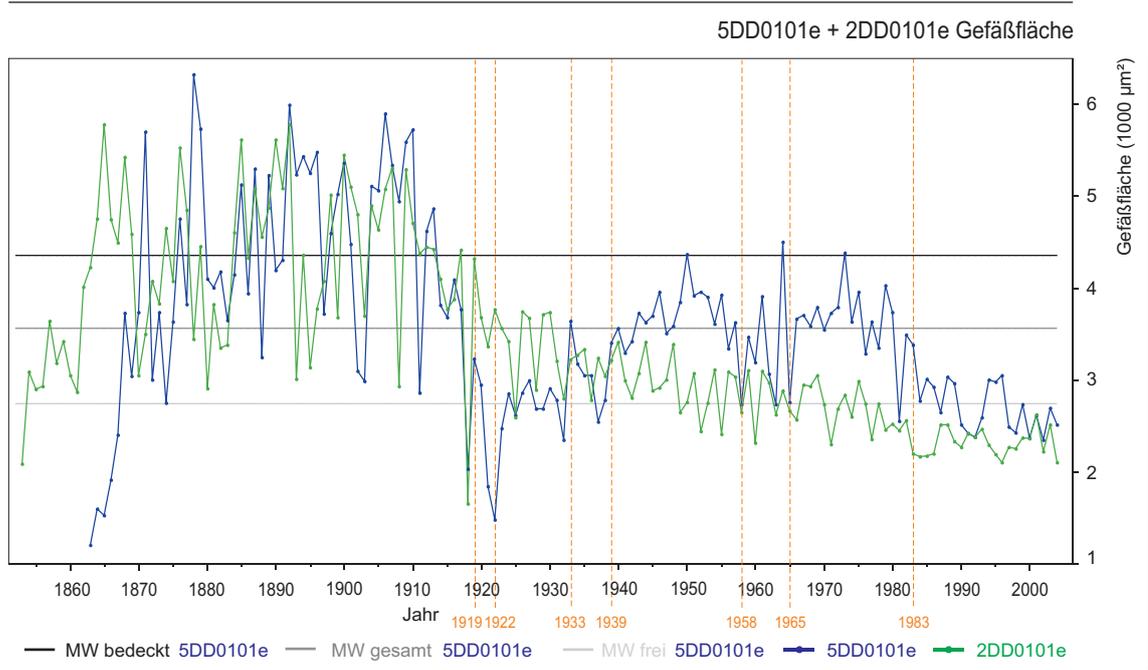


Abb. 6.40: Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 5DD0101e und 2DD0101e mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Kurve 5DD0101e (MW bedeckt), für die gesamte Kurve 5DD0101e (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 5DD0101e (MW frei). Der Verlauf der Kurve 5DD0101e lässt auf einen Wechsel zwischen Freilegung (1919-1932) einer erneuten Bedeckung (1933-1983) und der endgültigen Freilegung ab 1984 schließen.

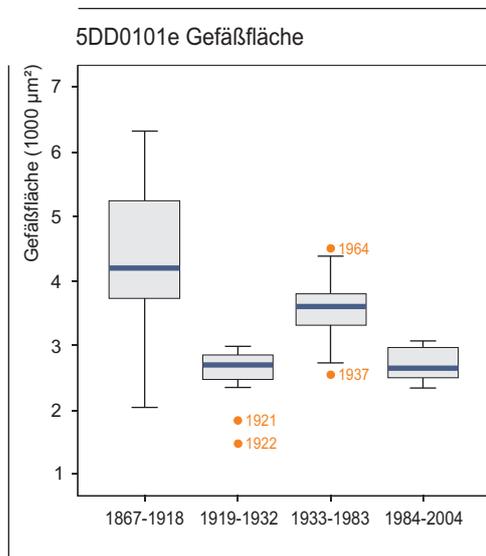


Abb. 6.41: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 5DD0101e, ermittelte Phasen der Freilegung in den Jahren 1919 bis 1932 und 1984 bis 2004. Deutlich wird auch die zwischenzeitliche Wiederbedeckung in den Jahren 1933 bis 1983.

Auf den hier auftretenden reversiblen Prozess von Strukturveränderungen im Zellaufbau der Wurzel, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden. Jedoch ist dieser Aspekt für zukünftige Untersuchungen von erheblicher Bedeutung, da dies zur Rekonstruktion von Erosionsprozessen und dabei auftretenden möglichen Verschüttungen, herangezogen werden kann.

Bei einem Vergleich der Querschnitte 1DD0101e und 2DD0101e (Abbildung 6.42) zeigt sich die Gefäßgrößenreduktion der Kurve 2DD0101e ab **1924** gegenüber der Probe 1DD0101e (Distanz 41 cm). Daraus folgt eine Annäherung an die damalige Bodenoberfläche von 2DD0101e zu einem früheren Zeitpunkt. Die Lage des Querschnittes 2DD0101e im Bezug zur Spalte und die Wurzelmorphologie waren ausschlaggebend für eine frühere Gefäßgrößenreduktion und phasenweise Freilegung.

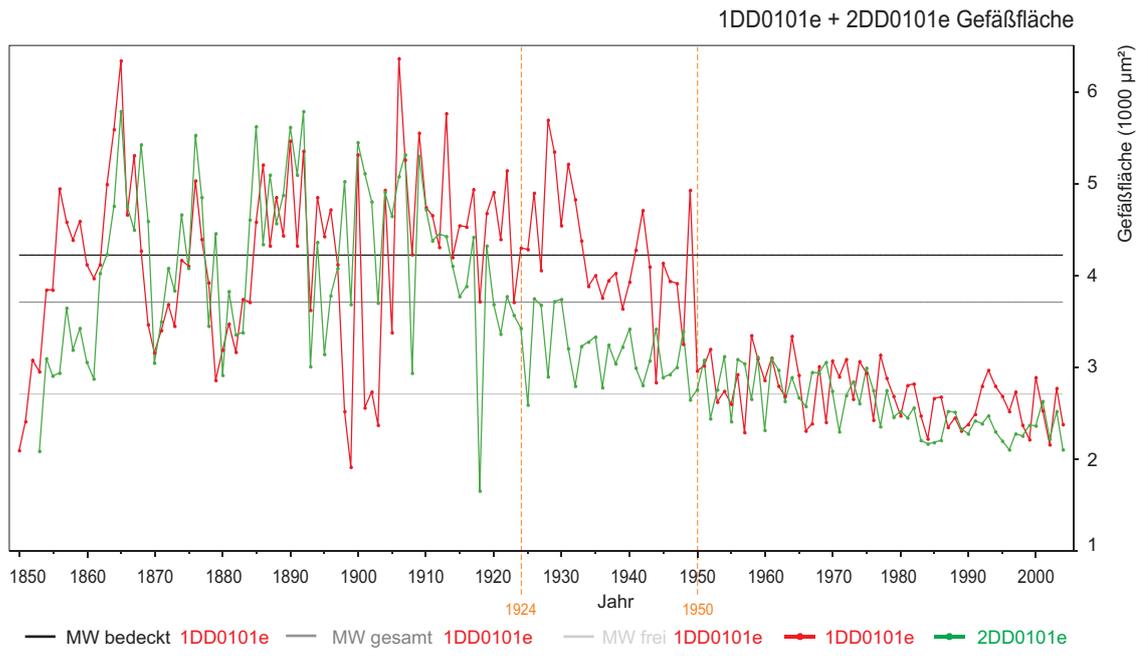


Abb. 6.42: Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 1DD0101e und 2DD0101e, mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Kurve 1DD0101e (MW bedeckt), für die gesamte Kurve 1DD0101e (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 1DD0101e (MW frei). Ab 1949/50 ist die Spaltenöffnung so weit fortgeschritten, dass die Querschnitte 1DD0101e und 2DD0101e frei lagen.

Ab dem Jahr **1950** (1DD0101e) erreicht auch die Kurve 1DD0101e das Niveau von 2DD0101e. Der mögliche Einfluss des oben beschriebenen Mooses (beide Proben stammen aus dem Teil der Wurzel mit Moosbedeckung, (vgl. Abb. 6.35 u. 6.38) führt zu einer ähnlich gleichmäßig verlaufenden Reduzierung der Gefäßgrößen (Abbildung 6.43) ab diesem Zeitpunkt. In Abbildung 6.44 ist die nicht freigelegte Probe 4DD0101f (vgl. Abb. 6.35) den freigelegten Proben 2DD0101e und 5DD0101e gegenübergestellt. Die nicht freigelegte Probe stammt aus einem Wurzelabschnitt der 13 cm tief im Boden bzw. entfernt von der Grenze Substrat/Freilegung zum Zeitpunkt der Entnahme wuchs. Die Kurve verläuft bis zum Jahr **1914** auf einem gleichen Level wie die beiden Kurven von 2DD0101e und 5DD0101e, mit vereinzelt negativen Ausschlägen von auskeilenden Jahrringen. Nach **1914** fallen die beiden freigelegten Kurven weiterhin ab, wohingegen die Kurve von 4DD0101f einen ansteigenden Trend aufweist, die ihr Maximum im Jahr **1919** mit 8308  $\mu\text{m}^2$  erreicht. Es folgt ein anhaltender Abwärtstrend, der von einem markanten Einschnitt in den Jahren **1950 bis 1953** unterbrochen wird. Dieser negative Bereich deckt sich mit der Reduktion der Gefäßflächen von 1DD0101e (Abbildung 6.45) und dem

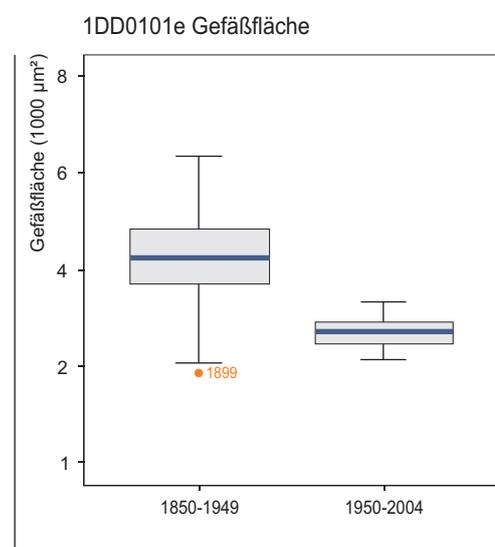


Abb. 6.43: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 1DD0101e von bedeckten (1850-1949) und freigelegten (1950-2004) Zeitabschnitten.

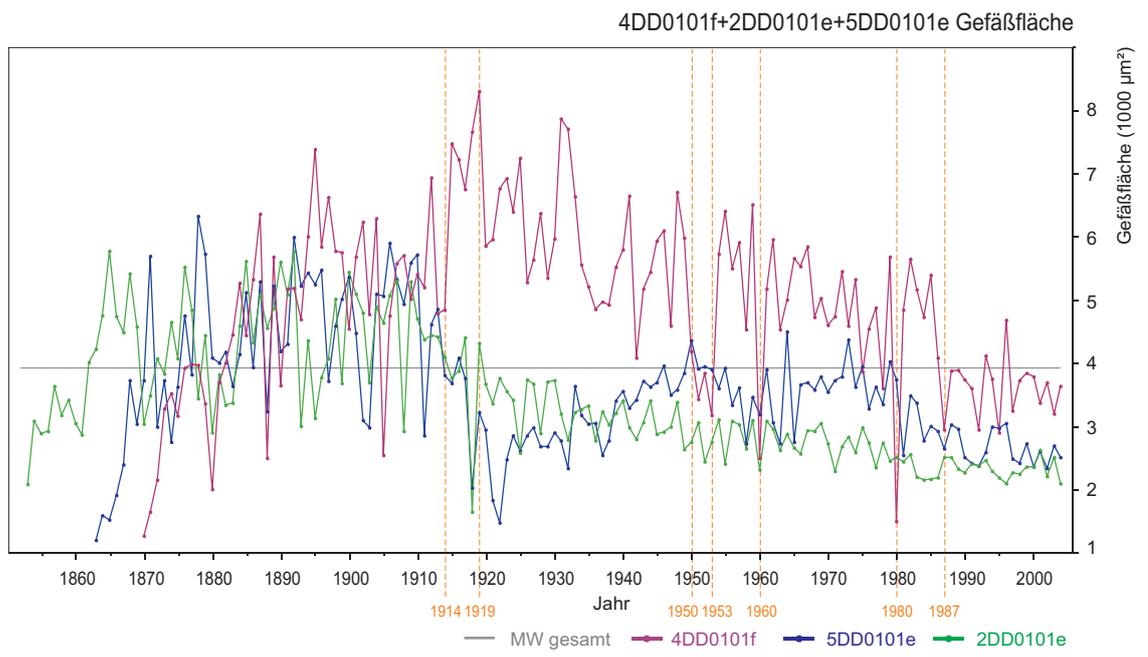


Abb. 6.44: Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 4DD0101f (nicht freigelegt), 2DD0101e und 5DD0101e (zum Zeitpunkt der Wurzelentnahme freigelegt). Mittelwert aller drei Kurven (MW gesamt). Die Werte des nicht freigelegten Teils (4DD0101f) bleiben im Vergleich zu den anderen Kurven auf einem signifikant höheren Niveau, trotz des markanten Einschnitts (1950-1953), den auskeilenden Jahrringen (1960, 1980) und dem Niveauwechsel 1987.

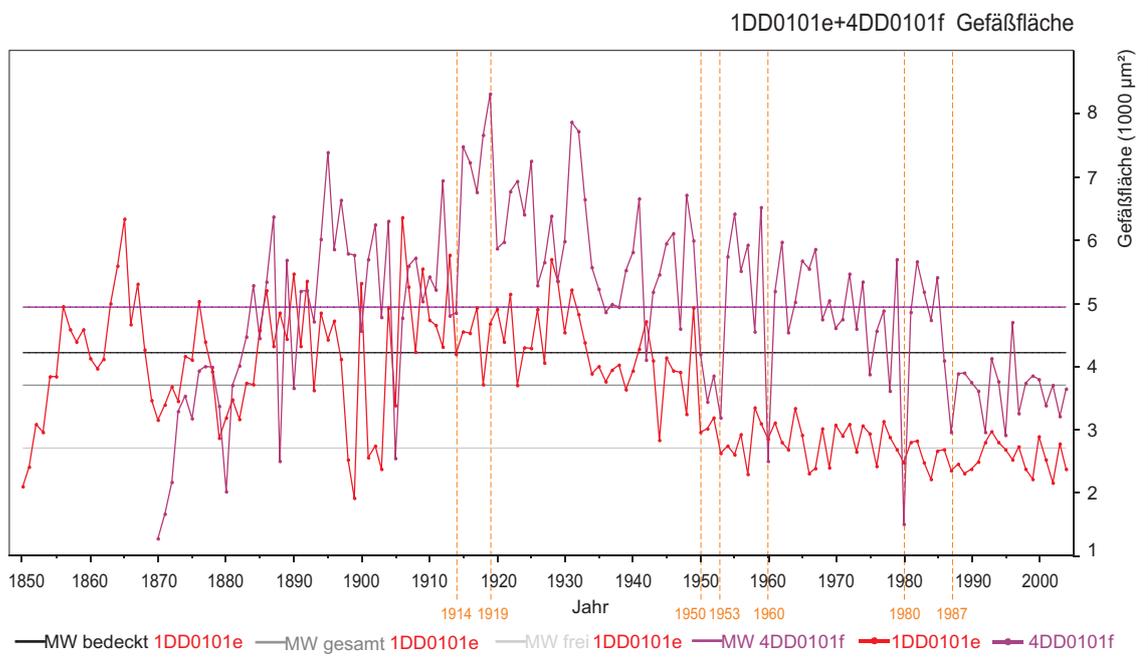


Abb. 6.45: Vergleich der Gefäßflächenmessungen von 4DD0101f (nicht freigelegt) und 1DD0101e (zum Zeitpunkt der Wurzelentnahme freigelegt) mit Mittelwerten für den bedeckten Teil der Kurve 1DD0101e (MW bedeckt), für die gesamte Kurve 1DD0101e (MW gesamt), für den freigelegten Zeitraum von 1DD0101e (MW frei) und dem Mittelwert der gesamten Kurve von 4DD0101f.

Wechsel auf ein tieferes Niveau bei 2DD0101e. Nach **1954** kehren die Werte jedoch auf das Ausgangsniveau der Vorjahre zurück. Die Jahre **1960** und **1980** zeigen sich als ausgeprägter Jahrring, mit auffällig kleineren Gefäßen. Ab **1986/87** fällt die Kurve auf ein markant niedrigeres Niveau. Hierin zeigt sich eine plötzliche Reduzierung der Distanz zwischen Wurzel und Bodenoberfläche aber noch keine Freilegung.

In Abbildung 6.46 wird noch einmal deutlich, dass sich die Größenreduzierung der Gefäßflächen auf die freigelegten Bereiche der Wurzel (1DD0101e, 2DD0101e) beschränken. Im Gegensatz dazu bleiben die Werte des nicht freigelegten Teils (4DD0101f) auf einem signifikant höheren Niveau.

Eine abschließende Betrachtung der Jahrringbreiten des zugehörigen Baumes, soll die Analyse dieses Standortes abschließen. Der Probenbaum SDD0101 ist 19 m hoch, hat einen Umfang von 108 cm und weist ein Alter von 163 Jahren auf. Dem Stamm wurden an vier Radien (vgl. Abb. 5.3) Bohrkern entnommen.

In Abbildung 6.47 u. 6.48 sind jeweils die zwei gegenüberliegenden Radien (SDD0101a- SDD0101b, SDD0101c-SDD0101d) der Referenzkurve (SDM07) des Untersuchungsgebietes Ritterholz/Dün gegenübergestellt.

Die Bohrkern SDD0101c und SDD0101d weisen in den Jahren **1889** bis **1891** (Abb. 6.48) einen extremen Peak in beiden Radien auf (SDD0101c 1890, JR-Breite 5,61 mm). In etwas abgeschwächter Form finden sich ebenfalls deutlich erhöhte Werte im selben Zeitraum in den Radien SDD0101a und SDD0101b (Abb. 6.47). Da sich diese Zunahme der Jahrringbreite über den gesamten Querschnitt des Baumes zeigt, ist die Möglichkeit gegeben, dass es hier zu einer erhöhten Verfügbarkeit von Bodennährstoffen oder des Gunstfaktors Licht gekommen ist.

Dem schließt sich in den Jahren danach, nur unterbrochen von dem Weiserjahr **1893**, eine anhaltende Exzentrizität auf den Radien SDD0101c (bis **1900**, Abb. 6.48) und SDD0101b (bis **1898**, Abb. 6.47) an. Wobei in geringer Ausprägung noch bis **1908** ein Jahrringbreitenunterschied zwischen SDD0101c und SDD0101d auszumachen ist. Für diesen Zeitraum ist eine Schrägstellung des Baumes in Richtung d-Achse mit einer Tendenz in Richtung a-Achse festzustellen. Die Neigungsrichtung des Baumes spricht für eine Kippung der Scholle mit einer komplexen Bewegungskomponente ab dem Jahr **1894** (Tabelle 6.5; Abb. 3.1).

Ab **1909** fällt die Kurve SDD0101c anhaltend unter das Niveau der drei anderen Radien. Von **1919** bis **1921** ist der Wechsel von Reaktionsholzbildungen von der c-Achse zur d-Achse bereits vollzogen. Ab **1936** bis **1956** zeichnet sich ein markanter Unterschied in der Jahrringbreite

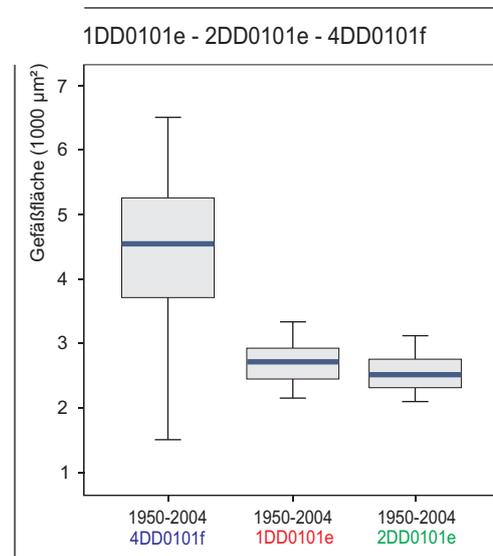


Abb. 6.46: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben 1DD0101e, 2DD0101e und 4DD0101f im selben Zeitraum 1950 bis 2004.

zwischen SDD0101c und SDD0101d ab. Für mehrere Jahre (bis **1948**) ist die Kurve SDD0101c auf einem sehr niedrigen Niveau. Im selben Zeitraum kommt es auf SDD0101d im Jahre **1949** zu einem starken Anstieg, der bis **1956** anhält.

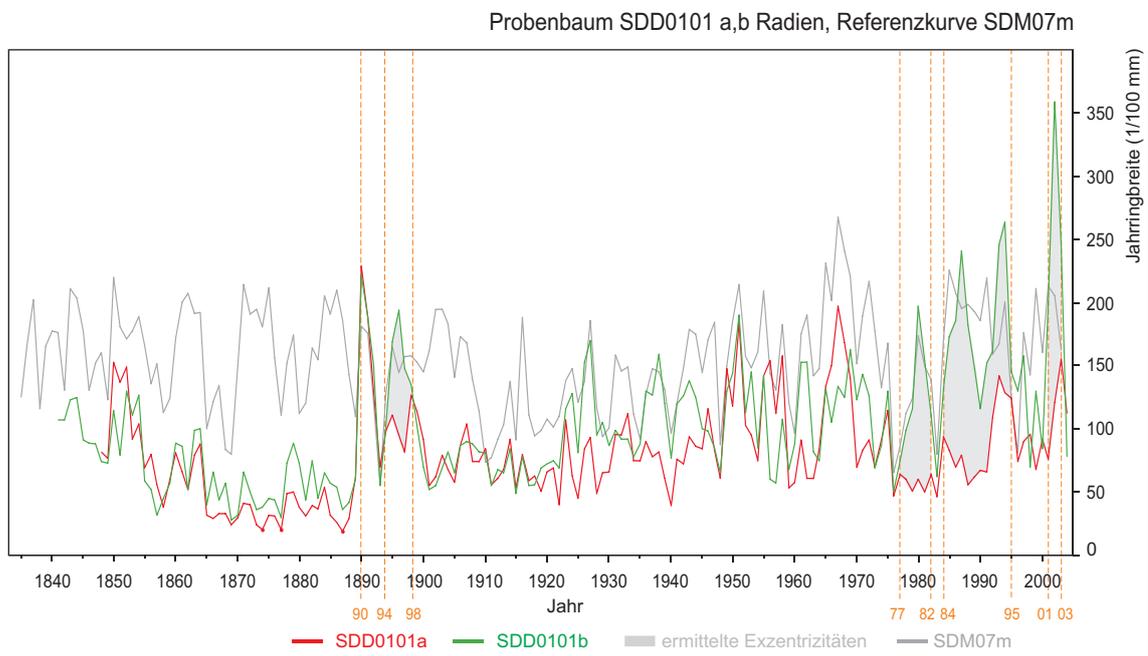


Abb. 6.47: Vergleich der Radien SDD0101a und SDD0101b des Probenbaums SDD0101 mit der Referenzkurve des Standortes (SDM07m). Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.

Der Wechsel der Reaktionsholzbildung auf die d-Achse (**1936-56**) spricht für einen neuen Bewegungsimpuls der von der Blockscholle ausgeht. Die Schrägstellung des Probenbaumes SDD0101 ist auf eine Rotation der Scholle zurückzuführen, die ihre stärkste Bewegung ab **1949** bis **1951** erfährt. Das stärkere Einsetzen der Reaktionsholzbildung (**1949-51**) auf der d-Achse, markiert auch den Anfangspunkt der weiteren Reduzierung der Gefäßgrößen auf dem Querschnitt 2DD0101e im Jahre **1948-49** (vgl. Abb. 6.36).

In den Zeiträumen **1968** bis **1971** ist noch einmal ein gegenläufiger Verlauf der Kurve SDD0101c im Bezug auf SDD0101d zu verzeichnen. Von **1986** bis **1990** erreicht SDD0101c das Niveau von SDD0101d und übertrifft dabei den Radius SDD0101a. Weniger stark ausgeprägt ist der Jahringbreitenunterschied zwischen SDD0101d und SDD0101c von **1997** bis **2003**.

Auf dem Radius SDD0101b in Abbildung 6.48 sind nach **1900** erst wieder in den Jahren **1977** bis **1982**, **1984** bis **1995** und **2001** bis **2003** deutliche Exzentrizitäten zu verifizieren.

Ab **1977** ändert sich somit ein wiederholtes Mal die Neigungsrichtung des Baumes SDD0101 von der c-Achse in Richtung a-Achse. Die wiederholt einsetzenden Exzentrizitäten, verbunden mit Reaktionsholz in den Jahren **1977** bis **2003** (vgl. Tab. 6.5), sprechen für eine sehr aktuelle Blockverlagerung in diesem Massenverlagerungsgebiet der Wellenkalk-Schichtstufe. Der Zusammenhang zu auftretenden extremen Niederschlagsereignissen wird in Tabelle 6.6 deutlich. Die endgültige Freilegung des Querschnittes 5DD0101e fällt genau in diese Periode (ab **1983**, Abb. 6.36).

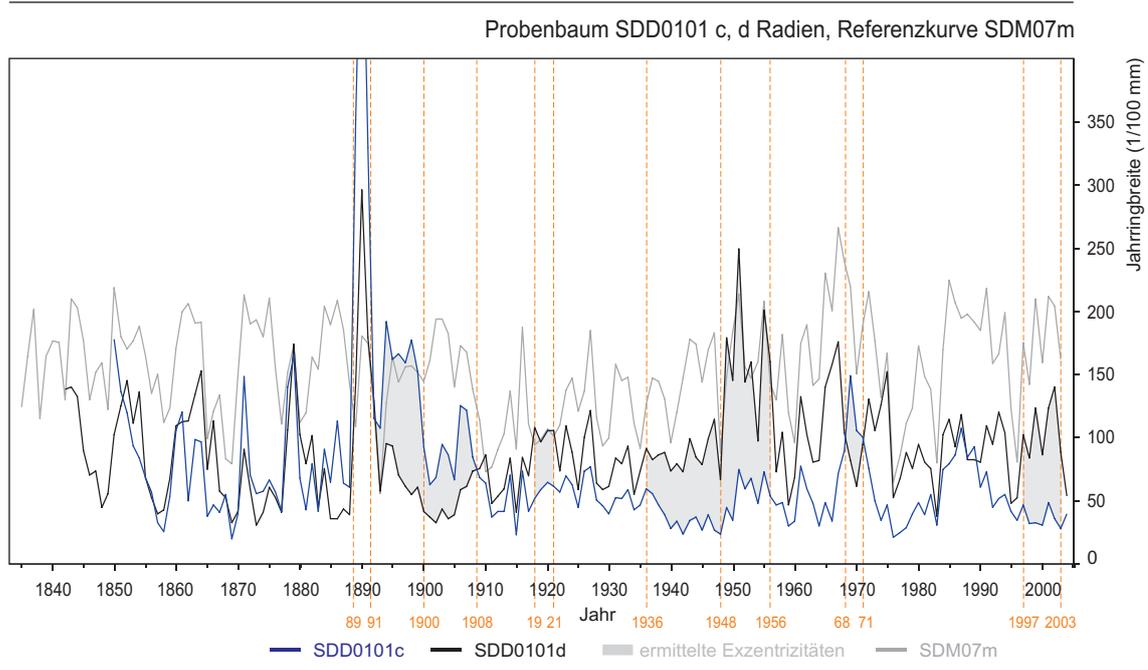


Abb. 6.48: Vergleich der Radien SDD0101c und SDD0101d des Probenbaums SDD0101 mit der Referenzkurve des Standortes (SDM07m). Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten, aber auch Gegenläufigkeiten (vgl. 1968 bis 1971).

Tab. 6.5: Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDD0101.

Zeiträume	SDD0101a	SDD0101b	SDD0101c	SDD0101d
1840-1860				
1861-1880				
1881-1900		1894-1898	1889-1900	
1901-1920			1901-1908	
1921-1940				1936-1940
1941-1960				1941-48, 1949-56
1961-1980		1977-1982	1968-1971	
1981-2004		1984-95, 2001-03		1997-2003

Die erstmalige Öffnung der Spalte erfolgte im Jahre **1919** (vgl. Abb. 6.40, 5DD0101e) auf Höhe des Querschnitts 5DD0101e. In der Folge wurde dieser Abschnitt der Wurzel von verlagertem Material wieder bedeckt. Ab **1949/50** ist die Spalteöffnung soweit fortgeschritten, dass die Querschnitte 1DD0101e und 2DD0101e frei lagen (Tab. 6.6). Das vorhandene Moos auf der Wurzel führte vermutlich zu einer wenig stark ausgeprägten Reduzierung der Gefäßflächen. Dieser Zeitraum korrespondiert mit der deutlichen Reaktionsholzbildung im Stamm des Baumes SDD0101 (vgl. Abb. 41, Tab. 6.5). Ab **1984** ist dann auch der Teil der Wurzel mit dem Querschnitt 5DD0101e wieder freigelegt. Die aktuelle Breite der Spalte in Höhe der Wurzel SDD0101e beträgt 192 cm.

Tab. 6.6: Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDD0101 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen (Jahresangabe, Zusammenstellung der einzelnen Stationen vgl. Anlage 5).

<b>Phasen</b>	<b>Abgeleitete geomorphologische Aktivität</b>	<b>Extreme Niederschlagsereignisse</b>
		Stationen: Hüpstedt, Leinefelde
1889-1891	Kluftbildung, geringe Bewegung	n.v.
1893-1900	starke Bewegung	n.v.
1901-1908	geringe Bewegung	1906
1909	Niveauwechsel von SDD0101c, geringe Bewegung	1909
1918-1919	Öffnung der Spalte auf Höhe von 5DD0101e	1917
1919-1922	Phase stärkerer Bewegung	1921, 1922, 1923
1932-1948	Oberflächennahes Wachstum von 2DD0101e, Erosion, geringe Bewegung	1926, 1933, 1935
1939-1983	erneute Bedeckung von 5DD0101e	1938
1948-1956	starke Bewegung , Freilegung der Querschnitte 1DD0101e,2DD0101e, 1950	1946, 1947, 1950, 1951, 1952
1978-1982	stärkere Bewegung	1978, 1980, 1981
1984	erneute Freilegung von 5DD0101e	1983, 1984
1984-1990	starke Bewegung	1984, 1988
1992-1995	starke Bewegung	1992, 1993, 1994
1997-2003	geringe bis starke Bewegung	1997, 1998, 2002

## 6.4 Zeitliche Rekonstruktion von Spaltenöffnungen

Die Grundlage für die Untersuchung von Spaltenöffnungen an verschiedenen Standorten der Wellenkalk-Schichtstufe bilden die Analyseergebnisse der Testfelder 1 und 2 und der natürlich freigelegten Wurzeln. Hierbei eröffnet das ermittelte diagnostische Merkmal, die Reduzierung der Gefäßgrößen um mehr als 35% im Vergleich zu den Vorjahren, neue Möglichkeiten zur Rekonstruktion der untersuchten geomorphologischen Prozesse.

Anhand diagnostizierbarer holzanatomischer Veränderungen in den Strukturen natürlich freigelegter Wurzeln, erfolgt eine zeitliche Rekonstruktion von Spaltenöffnungen. Auftretende Exzentrizitäten im Stamm des entsprechenden Baumes werden zur Analyse hinzugezogen.

Das Potenzial der Methode soll an einigen Beispielen aufgezeigt werden. Mit dem Standort im Junkerholz/Westerwald (**Junkerholz/Westerwald (Eichsfeld); Karte 6**) wird zur Rekonstruktion der Kinematik von Spaltenöffnungen übergeleitet.

### 6.4.1 Junkerholz / Westerwald (Eichsfeld)

Zur Rekonstruktion einer initialen Spaltenöffnung am Standort SDE0102e (**Junkerholz/Westerwald; Karte 6**) im Eichsfeld, wurde am Rande der Spalte ein Teil einer freigelegten Wurzel (SDE0101e) entnommen (Abbildung 6.49, Pfeil).



Abb. 6.49: Standort SDE0102, Junkerholz/Westerwald mit Wurzel SDE0102e (Pfeil) und Probenbaum SDE0102. Die Blickrichtung des kleineren Bildes (A) entspricht der Signatur (A) im großen Foto.

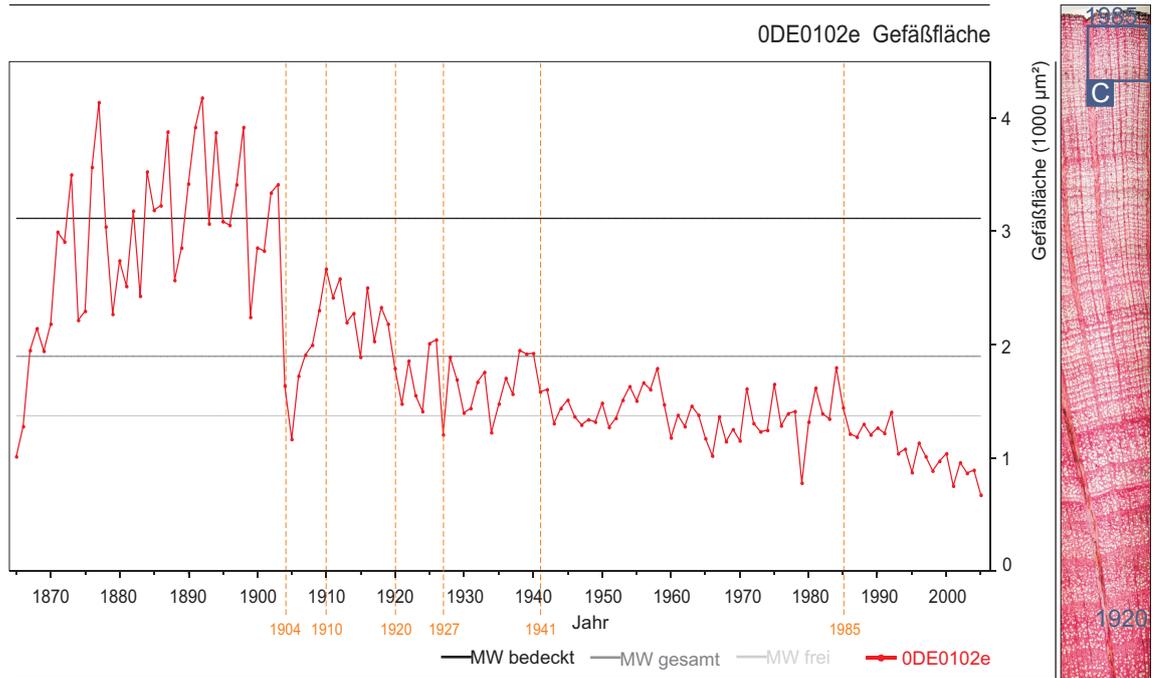
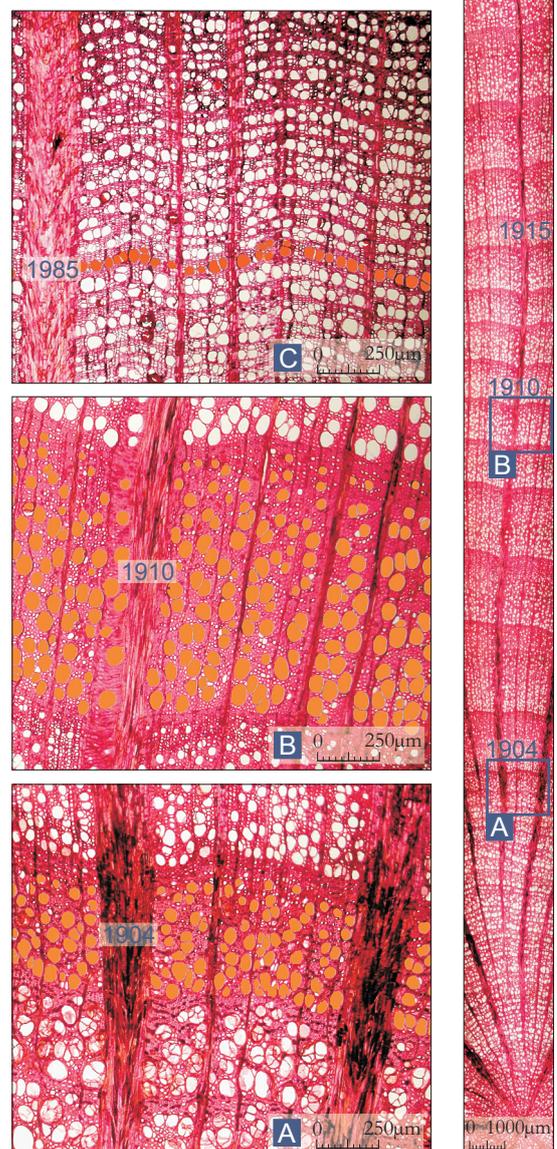


Abb. 6.50: Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von ODE0102e mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von ODE0102e (MW frei). Die Freilegung erfolgte im Jahr 1904 mit einer zeitweiligen erneuten Bedeckung von 1910 bis 1920. Von 1920-1940 Wechselspiel zwischen Freilegung und teilweiser Verschüttung, ab 1941 endgültige Freilegung.

Rechts: Das Jahr 1904 markiert das Einsetzen von einer abrupten Zunahme der Jahrringbreite. Erneute Bedeckung mit Bodenmaterial ab 1910 und 1985 setzt ein Absterben dieses Wurzelabschnitts ein.

Schon bei der Entnahme wurde festgestellt, dass Teile des freigelegten Wurzelsystems im Bereich des Zentralzylinders morsch waren. Bei der Probenauswahl wurde deshalb darauf geachtet, dass ein Wurzelabschnitt mit vollständig erhaltenen Querschnitt ausgewählt wird (Abb. 6.49, kleines Bild links). Letztendlich sollte die Probe der Spalte am nächsten sein. Die Wurzel SDE0102e und der zugehörige Baum SDE0102 stammen von der stabilen Seite der Spalte. Die Analyse der Dünnschnitte ergab für die Jahre **1904/05** (Abbildung 6.50, A) eine abrupte Zunahme der Jahrringbreiten. Verbunden war



dies mit einer deutlichen Abnahme der Gefäßgrößen im Jahr **1904** (Abb. 6.50, Kurve), die sich aber bis 1910 wieder regenerierten. Daraus folgte eine kurzzeitige Freilegung der Wurzel mit erneuter Bedeckung durch verlagertes Bodenmaterial ab **1910**.

Die Reduzierung der anhaltenden Exzentrizitäten bis **1915** lassen auf eine Abnahme der mechanischen Belastungen schließen. Eine erneute Zunahme der Jahrringbreiten ab **1916** geht über eine wiederholte Freilegung im Jahre **1920** hinaus. Ab **1921** haben die Gefäßgrößen erneut das Niveau einer Freilegung erreicht (Abbildung 6.51). Jedoch finden sich bis **1940** immer wieder Schwankungen der Kurve, die auf eine Einbettung durch verlagertes Bodenmaterial schließen lassen (vgl. Abb. 6.50). Ab **1941** ist dieser Wurzelabschnitt vollständig freigelegt. Auffällig ist noch das Jahr **1985**. Ab diesem Zeitpunkt setzt eine weitere Abnahme der Gefäßgrößen ein, wobei davon ausgegangen werden muss, dass dies ein Zeichen für das Absterben dieses Wurzelabschnittes ist.

Anhand der Analyse der Gefäßflächen lässt sich der Öffnungszeitpunkt der Spalte auf das Jahr **1904** festlegen. Alle nachfolgenden Größenschwankungen der Gefäßflächen sind die Folge von sekundären Prozessen nach der Öffnung der Spalte. Die einzelnen Zeiträume mit Reaktionsholzbildungen im Dünnschnitt (zu erkennen an dem sehr dichten Grundgewebe, durch Verdickung der Zellwände der Fasern mit gelantinösen Schichten, vgl. Abb. 6.50 z.B. 1910), sind die Folge einer abrupten Freilegung (**1904-1910**) und eines kontinuierlichen Bodenabtrages durch Erosion (**1911-1920**).

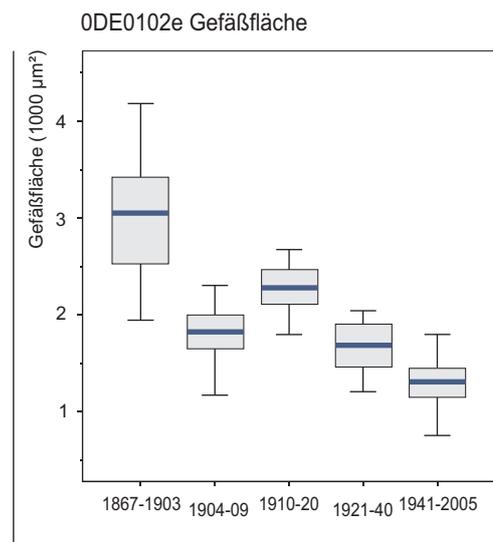


Abb. 6.51 - Boxplot: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe ODE0102e, nach der Freilegung im Jahre 1904 und einer zeitweiligen erneuten Bedeckung von 1910 bis 1920.

Die Analyse der Baumradien bestätigt diese Annahme. In Abbildung 6.52 sind die vier Radien des Baumes SDE0102 dargestellt. Von **1892** bis **1896** ist ein deutlicher positiver Ausschlag auf der c-Achse zu verzeichnen. Im Jahr **1893/94** ist auf allen vier Radien ein deutlich positiver Ausschlag auszumachen. Jedoch erreichen die anderen drei Radien a, b und d nicht dieses Maximum von c (5,06 mm Jahrringbreite). Hier ist noch keine typische Reaktionsholzbildung zu verzeichnen. Der Öffnung der Spalte gehen vermutlich Veränderungen im Untergrund voraus, zum Beispiel Kluffbildungen. Eine mögliche Ursache dafür liegt in einer erhöhten Verfügbarkeit von Bodennährstoffen aber auch ein erhöhter Lichteinfluss kann hier der Auslöser gewesen sein. Dem markanten positiven Ausschlag fehlen die reduzierten Jahrringbreiten auf der Gegenseite.

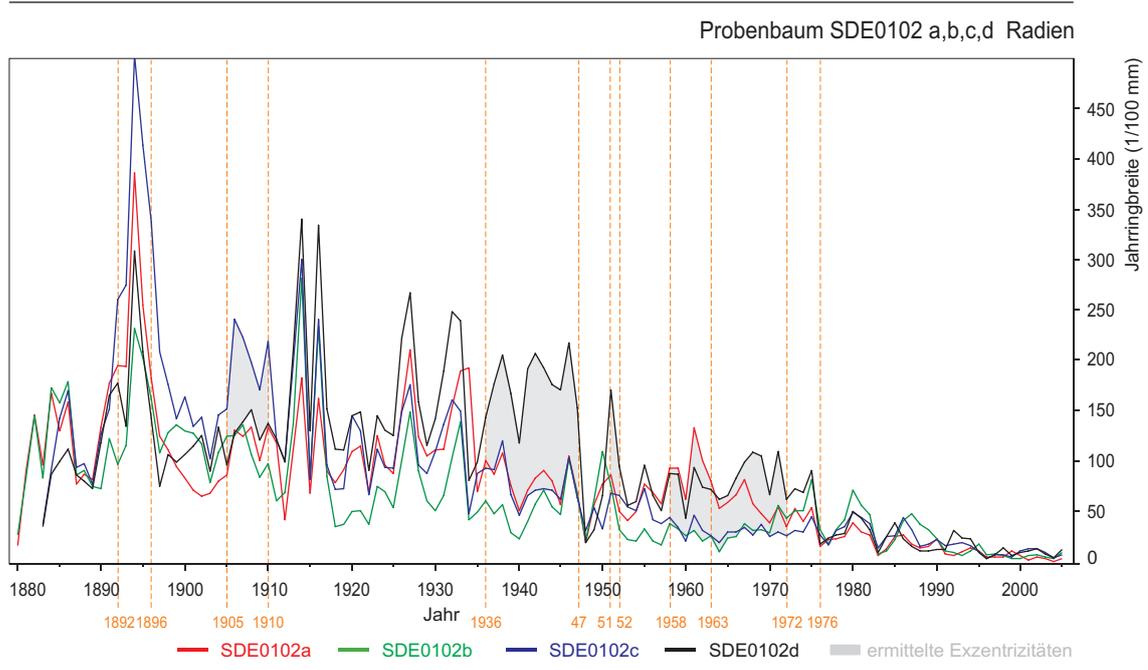


Abb. 6.52: Vergleich der Radien SDE0102a, SDE0102b, SDE0102c und SDE0102d des Probenbaums SDE0102. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.

Erst die Zunahme der Jahringbreite auf der c-Achse ab **1905** anhaltend bis **1910**, lassen auf eine Schrägstellung des Baumes schließen. Dieser Zeitraum entspricht der ersten Freilegung der Wurzel SDE0101e. Hiermit kompensiert der Baum die Neigung in Richtung Hangunterseite durch das Anlegen von Zugholz auf der c-Achse. (Abb. 5.3). Die Hangunterseite entspricht hierbei dem Bereich in dem sich die Spalte öffnet. In der Folge treten weitere Exzentrizitäten auf, wobei sich die Lage des Reaktionsholzes auf dem Querschnitt von der c-Achse auf die d-Achse ab **1911** verlagert, jedoch stärker ab **1936** bis **1947** und **1951** bis **1952**. Die Neigung des Baumes wechselt in die entgegen gesetzte Richtung, zur Hangoberseite. Weitere Ereignisjahre zeigen eine anhaltende geomorphologische Aktivität (**1914**, **1916**, **1926/27**, **1932/33**, Tabelle 6.7). Der Wechsel der Neigungsrichtung von der c-Achse auf die d-Achse ist die Folge von wechselnden Zugbelastungen innerhalb des Bodens. Im weiteren Verlauf wurden Teile des Wurzelwerks auf der hangabwärts gerichteten Seite des Baumes SDE0102e so in Tab. 6.7: Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDE0102.

Zeiträume	SDE0102a	SDE0102b	SDE0102c	SDE0102d
1881-1900				
1901-1920			1905-1910	1914,1916
1921-1940				1926/27,1932/33,1936-40
1941-1960	1958-1960			1941-47, 1951-52
1961-1980	1961-1963			1967-1972
1981-2005				

Mitleidenschaft gezogen, dass sie dem Baum nicht mehr den nötigen Halt auf dieser Seite bieten konnten. Die aktuelle Situation des Baumes ist in Abbildung 6.49 nochmals dargestellt. Es fällt auf, dass auf der Hangunterseite des Baumes SDB0102e große Teile des Wurzelwerkes fehlen.

Tab. 6.8: Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDE0102 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen (Jahresangabe, Zusammenstellung der einzelnen Stationen vgl. Anlage 5).

Phasen	Abgeleitete geomorphologische Aktivität	Extreme Niederschlagsereignisse
Stationen: Eigenrieden, Dingelstedt, Eschwege		
1892-1896	Kluftbildung	n.v.
1904	Spaltenöffnung	1904
1905-1910	starke Bewegung, Schrägstellung	--
1911-1920	Erosion und Ereignissjahre 1914,1916, geringe Bewegung	1912, 1914
1920-1927	geringe Bewegung, Erosion mit erneuter Bedeckung der Wurzel	1921, 1923, 1924, 1926
1932-1933	geringe Bewegung, Erosion mit erneuter Bedeckung der Wurzel	1933
1936-	starke Bewegung	1935
1941	vollständige Freilegung der gesamten Wurzel	--
-1947	starke Bewegung	1944, 1946, 1947
1951-1952	geringe Bewegung	--
1958-1963	geringe Bewegung	1954
1964-1972	stärkere Bewegung	1965, 1967, 1971, 1972
1977	weitere Wachstumsreduzierung im Stamm, Erosion, geringe Bewegungen	1977
1985	Absterben des entnommenen Wurzelabschnittes	--

Ab **1958** wechselt die Zugholzbildung von der d-Achse zum Teil auf die a-Achse, wobei die a-Achse nur bis **1963** wenig deutlich über c liegt. Ab **1964 bis 1972** ist die Reaktionsholzbildung auf die d-Achse zurückgekehrt.

Nach dem Weiserjahr **1976** erholen sich die einzelnen Radien noch ein wenig, allerdings ist hier schon ein sehr niedriges Niveau der Jahrringbreiten erreicht. Dieser deutlich abnehmende Trend der Jahrringbreiten lässt darauf schließen, dass ein großer Teil des Wurzelwerkes beschädigt oder schon abgestorben ist. Jedenfalls ist die Versorgung des Baumes nicht mehr im ausreichenden Maße gegeben. Diese These wird auch durch die oben beschriebenen vorgefundenen morschen Wurzelabschnitte gestützt.

Alle analysierten Phasen von geomorphologischer Kinematik an diesem Standort sind in Tabelle 6.8 zusammenfassend dargestellt und zeigen einen markanten Zusammenhang zu ermittelten extremen Niederschlagsereignissen.

#### 6.4.2 Appental / Trefffurter Stadtwald (Ringau)

Die Situation der entnommenen Wurzelprobe ist in Abbildung 6.53 dargestellt. Die Wurzel SDT0101e durchzog die initiale Spalte mit der dargestellten Wuchsrichtung von links nach rechts. Wie der geomorphologischen Detailkartierung zu entnehmen ist (Appental, Trefffurter Stadtwald/ Ringau Karte 7), gehört die Spalte zu einem Spaltensystem, welches sich auf der Stufenfläche fortsetzt. Der Beprobungsstandort befindet sich wenige Meter unterhalb der Trauf.

Alle drei Querschnitte entstammen dem freigelegten Teil der Wurzel SDT0101e und verteilen sich in Wuchsrichtung gleichmäßig über den gesamten Strang. Die Auswertung aller drei Dünnschnitte ODT0101e, 1DT0101e und 2DT0101e ergab ein gleiches Bild ab **1993**.



Abb. 6.53: Standort SDT0101, Appental/Trefffurter Stadtwald (Ringau) die Pfeile markieren den entnommenen Wurzelstrang SDT0101e.

Abbildung 6.54 (S. 108, rechts) zeigt den Dünnschnitt der Probe 2DT0101e. Markiert ist das Jahr **1993**, ab dem eine Reduzierung der Gefäßgrößen einsetzt. Ab diesem Jahr (**1993**) kommt es zu einer Zunahme der Jahrringbreiten, die jedoch in ihrer Ausprägung Schwankungen unterliegt. Die Auswertung der Gefäßgrößenmessungen macht die auf dem Dünnschnitt schon sichtbare Reduzierung mit einem Abfall der Kurve bei allen untersuchten Proben deutlich (Abb. 6.54. S. 108, oben). In der Kurvendarstellung ist das Jahr **1993** markiert. Ab diesem Zeitpunkt ist eine dauerhafte Reduzierung der Gefäßflächen um mehr als 35% im Vergleich zu den Vorjahren festzustellen. Somit ist die Wurzel seit **1993** freigelegt (vgl. Abbildung 6.55).

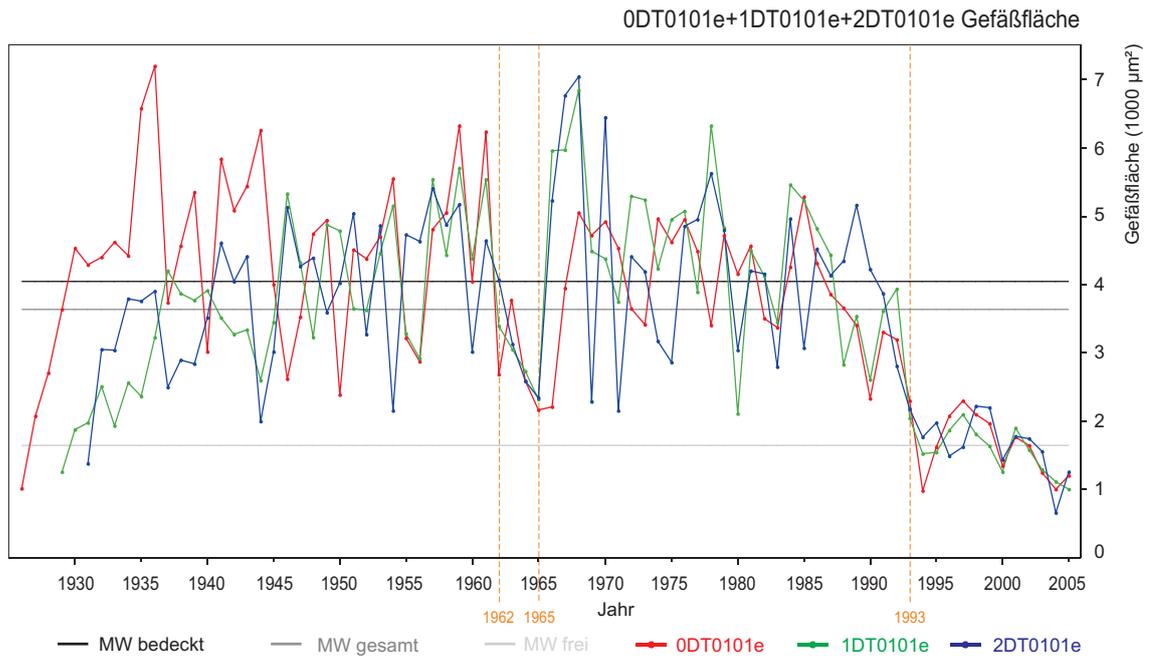


Abb. 6.54: Oben: Gefäßflächenmessungen der Wurzel SDT0101e. Dargestellt sind die Querschnitte ODT0101e, 1DT0101e und 2DT0101e. Alle drei genannten Querschnitte wurden im selben Jahr (1993) freigelegt. Die Mittelwerte beziehen sich auf alle drei Kurven. Rechts: Dünnschnitt der Probe 2DT0101e. Markiert ist das Jahr (1993) der Freilegung.

Auf die markierten Jahre **1962-1965** wird am Ende dieses Kapitels näher eingegangen, da sie mit den nachfolgend aufgeführten Instabilitäten des Baumes in Verbindung stehen.

Mit den Daten des Probenbaumes SDT0101 wird die Analyse dieses Standortes abgeschlossen. Die minimalste Entfernung der Wurzel SDT0101e zum beprobten Baum beträgt 145 cm. In Abbildung 6.56 sind alle vier Radien (a, b, c, d) dargestellt. In den Jahren **1926/27** und **1932/33** sind geringe Exzentrizitäten auf der c-Achse (Hangoberseite) auszumachen. In **1932/33** verschiebt sich die Ausbildung von Reaktionsholz bereits in Richtung a-Achse. Somit erfolgte in den Jahren **1926/1927** eine Neigung des Baumes in Richtung d-Achse und danach (**1932/1933**) bereits eine Verschiebung zur b-Achse hin. **1935** bis **1937** findet sich fast ausschließlich auf der a-Achse ein Ausschlag. In den folgenden Jahren wechselt noch einmal die Richtung von der a-Achse zur c-Achse (**1940-1943, 1949-1953**). Zwei markante Ausschläge in den Zeiträumen **1955 bis 1959** und **1965 bis 1970** lassen eine erhöhte geomorphologische Aktivität vermuten( Abb. 6.56, Tabelle 6.9). In diesen Zeiträumen wird der Baum SDT0101 deutlich in Richtung b-Achse schräg gestellt. Da auf der d- und c-Achse Einbrüche in den Jahrringbreiten zu verzeichnen sind, kann von einer Kluftbildung bis hin zur unterirdischen Öffnung der Spalte ausgegangen werden. Jedoch ist die Spalte nicht über ihre gesamte Länge an der



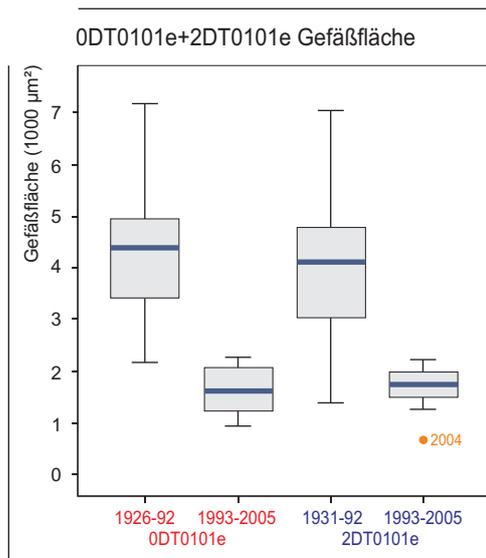


Abb. 6.55: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelproben ODT0101e und 2DT0101e im Zeitraum 1926 bis 2005 bzw. 1931 bis 2005. Die unterschiedlichen Niveaus stellen jeweils den bedeckten (1926-92; 1931-92) und freigelegten (1993-2005) Zeitabschnitt dar.

Oberfläche als morphologische Form zu erkennen (Abb.6.53). Ein weiteres Indiz für eine eher langsam ablaufende Öffnung der Spalte über einen längeren Zeitraum ist der schrittweise Anstieg der Jahrringbreite über vier Jahre (1955 bis 1958). In der Folge kommt es nochmals zu einem Maximum im Jahre 1966.

Die Veränderungen im Untergrund hatten eine Reduzierung der Gefäßgrößen in der Wurzel zur Folge. Für den Zeitraum 1962 bis 1965 ist eine kurzzeitige Reduzierung der Gefäßflächen zu verzeichnen (Abb. 6.54). Jedoch erfolgte diese Reduktion nicht in ausreichendem Maße, so dass davon ausgegangen werden muss, dass keine Freilegung erfolgte. Ein erneuter Anstieg in späteren Jahren lässt auf eine anhaltende Bedeckung der Wurzel schließen.

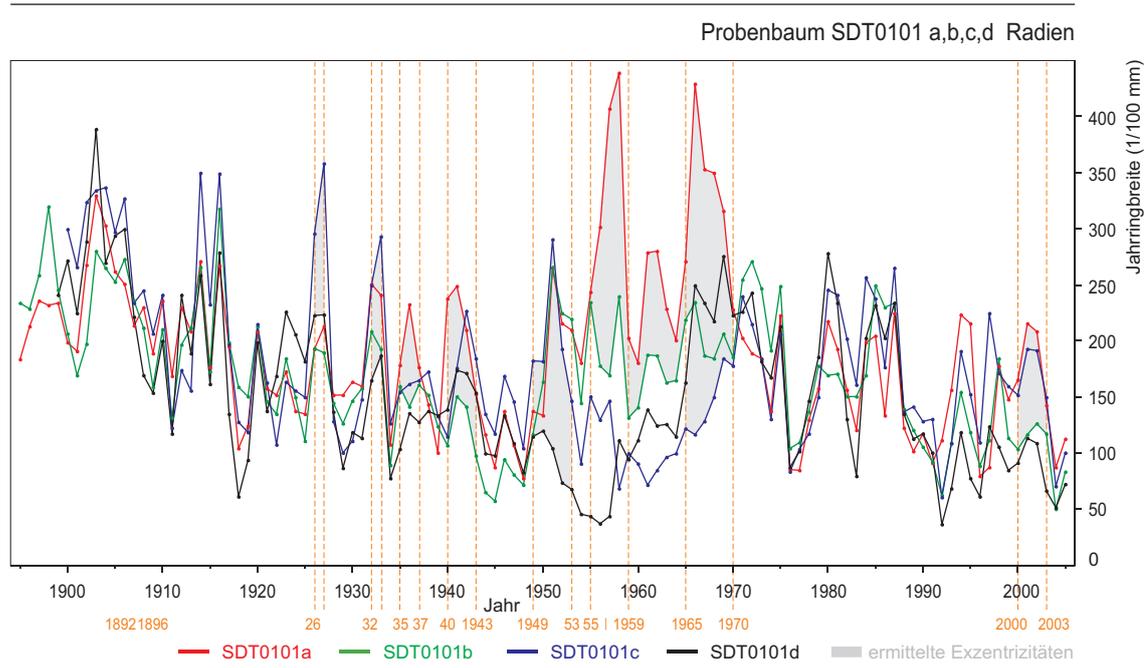


Abb. 6.56: Vergleich der Radien SDT0101a, SDT0101b, SDT0101c und SDT0101d des Probenbaums SDT0101. Grau unterlegt sind Zeiträume mit auffälligen Exzentrizitäten.

Die Freilegung der Wurzel im Jahre 1993 ist auf ein kleineres Ereignis zurückzuführen, da in Richtung der Stufenfläche keine ausgeprägte Tiefenlinie zu finden ist. Bei einer stärkeren Bewegung des Untergrundes hätte es zu sichtbaren Veränderungen in direkter Umgebung der Wurzel SDT0101e an der Bodenoberfläche kommen müssen. Weiterhin finden sich im Jahrringbild des Baumes SDT0101e keine markanten Reaktionsholzbildungen für diesen Zeitpunkt. Erst wieder

in den Jahren **2000** bis **2003** sind geringe Exzentrizitäten auf der a- und c-Achse auszumachen ist (Tabelle 6.9). Die ermittelten Phasen sind in Tabelle 6.10 markanten Niederschlagsereignissen gegenübergestellt.

Es ist davon auszugehen, dass die Spaltenöffnung, in den Jahren **1955** bis **1959** und nochmals **1965** bis **1970** erfolgte. Die aktuelle Breite der Spalte beträgt 60 cm.

Tab. 6.9: Zeiträume ermittelter Exzentrizitäten der entsprechenden Radien von SDT0101.

Zeiträume	SDT0101a	SDT0101b	SDT0101c	SDT0101d
1881-1900				
1901-1920				
1921-1940	1935-1937		1926/27, 1932/33	
1941-1960	1955-1959		1940-43, 1949-53	
1961-1980	1965-1970			
1981-2005	2000-2003		2000-2003	

Tab. 6.10: Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDT0101 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen (Jahresangabe, Zusammenstellung der einzelnen Stationen vgl. Anlage 5).

Phasen	Abgeleitete geomorphologische Aktivität	Extreme Niederschlagsereignisse
		Stationen: Treffurt, Eigenrieden, Eschwege
1926-1927	starke Bewegung, Kluftbildung	1926
1932-1933	geringe Bewegung	1933
1935-1937	geringe Bewegung	--
1940-1943	geringe Bewegung	1941
1949-1953	stärkere Bewegung, Kluftbildung	1944, 1947
1955-1959	starke Bewegung, unterirdische Öffnung der Spalte	1954, 1955
1962-1965	kurzzeitiger Wachstumseinbruch in der Wurzel	1960
1965-1970	starke Bewegung, weitere Öffnung der Spalte	1965, 1966, 1967
1993	Freilegung der Wurzel durch kleineres Ereignis, geringe Bewegung	n.v.
2000-2003	geringe Bewegung	2001, 2002, 2003

### 6.4.3 Ritterholz (Dün)

Im Untersuchungsgebiet Ritterholz am Dün befindet sich in einer Entfernung von 10 m zum Standort SDD0101 (vgl. Kap. 6.3.3) der Standort SDD0104.

Die untersuchte Wurzel überspannte am Fuß einer stufenartigen Absenkung einen Teil des abgesenkten Bereiches. Der vertikale Versatz der Bodenoberflächen betrug 65 cm. Teilweise wurde das Bodensubstrat vom Wurzelgeflecht gehalten, nur die Wurzelprobe SDD0104f lag über eine Länge von 25 cm frei (Abbildung 6.57, Pfeil). Lediglich durch die Bedeckung mit Laub war die erste Lokalisierung der Wurzel erschwert.

In Abbildung 6.58 ist die Gefäßflächenmessung des Querschnittes 1DD0104f dargestellt. Von 1908 bis 1959 kann anhand der Kurve ein gleichmäßiges Wachstum in



Abb. 6.57: Standort SDD0104, Ritterholz (Dün), die Balken markieren den entnommenen Wurzelstrang SDD0104f (Pfeil).

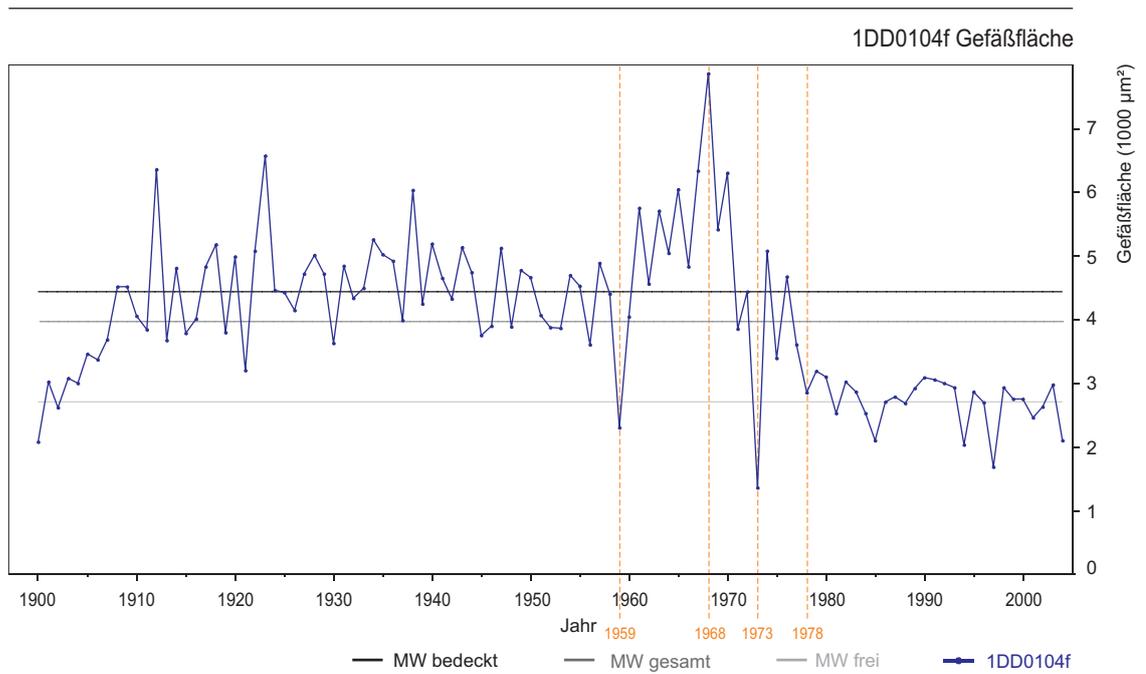


Abb. 6.58: Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 1DD0104f mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die freigelegten Zeiträume von 1DD0104f (MW frei). Auskeilende Jahrringe im Jahre 1959 und 1973. Ab dem Jahr 1978 ist die Freilegung erfolgt.

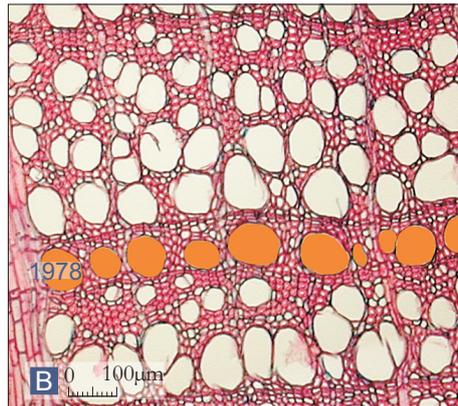
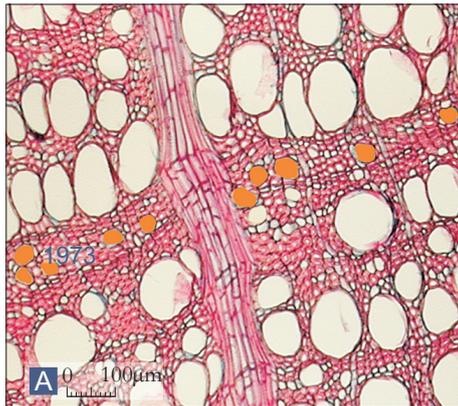


Abb. 6.59: Deutlich wird die Gefäßgrößenreduktion im Dünnschnitt rechts außen. Die Ausschnitte zeigen den auskeilenden Jahrring 1973 (A) und das Freilegungsjahr 1978 (B). Auskeilende Jahrringe im Jahre 1959 und 1973. Ab dem Jahr 1978 ist die Freilegung erfolgt (vgl. Abb. 6.58).

gleich bleibender Tiefe festgestellt werden. Nach einem auskeilenden Jahrring im Jahre **1959** steigen die Gefäßflächen bis zum Maximum **1968** an. Ab **1969** ist ein Abwärtstrend zu verzeichnen, der nur von dem auskeilenden Jahrring **1973** unterbrochen wird (Abb. 6.59, A). Obwohl weiterhin noch Schwankungen in den Gefäßgrößen auftreten, ist die Freilegung ab dem Jahr **1978** erfolgt (Abb. 6.59, B; 6.60). Zum Teil liegen die Werte der Gefäßflächenmessung knapp über dem Schwellenwert einer 35%igen Reduzierung. Es ist davon auszugehen, dass die vorgefundene Laubbedeckung eine nicht unerhebliche

Pufferwirkung auf die Reduktion der Gefäßflächen ausübte. An diesem Beispiel wird deutlich, dass die alleinige Interpretation von negativen Ausschlägen

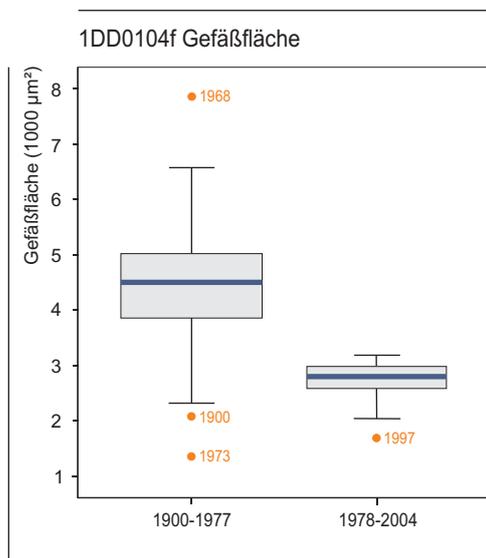


Abb. 6.60: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Gefäßflächenmessung der Wurzelprobe 1DD0104f von bedeckten (1900-1977) und freigelegten (1978-2004) Zeitabschnitten.

innerhalb der Messkurven nicht ausreicht. Für die Analyse der Freilegungsreaktion muss wiederholt eine mikroskopische Kontrolle des Dünnschnittes erfolgen, da sonst markante Ausschläge (wie **1973**) falsch interpretiert werden könnten. Die Ergebnisse dieses Standortes weisen auf aktuelle Aktivitäten im Untergrund (z.B. Kluffbildung) hin. Ebenso ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen einsetzender geomorphologischer Kinematik und dem Auftreten von extremen Niederschlagsereignissen zu verzeichnen (Tabelle 6.11, S.113).



Tab. 6.11: Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDD0104 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen (Jahresangabe, Zusammenstellung der einzelnen Stationen vgl. Anlage 5).

Phasen	Abgeleitete geomorphologische Aktivität	Extreme Niederschlagsereignisse
		Stationen: Hüpstedt, Leinefelde
1978	Kluftbildung mit stufenartige Absenkung Freilegung der Wurzel SDD0104e	1977, 1978

Ein weiteres Indiz für rezente Bewegungen sind zahlreiche Depressionen an der Trauf und auf der Stufenfläche, wo initiale Spaltenbildungen bzw. Hohlformen zu finden sind (vgl. Karte 4, Ritterholz/Dün, Standort SDD0104).

#### 6.4.4 Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge)

Abschließend wird ein Beispiel präsentiert, welches nach erfolgter Freilegung eine erneute Bedeckung mit verlagertem Bodenmaterial erfahren hat. Hiermit soll die Reversibilität der Reduktion der Gefäßfläche aufgezeigt werden.

Am westlichen Rand des Massenverlagerungsgebietes Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge), oberhalb einer Mauerscholle, (vgl. Karte 1, Krajaer Kopf/Bleicheröder Berge, Standort SDB0101), wurde im Bereich der Abrisskante eine Wurzel entnommen. Die 65 cm lange Wurzelprobe lag in einem anhaltend erodierenden kleineren Hang komplett frei. Das entnommene Wurzelstück ist in der Abbildung 6.61 markiert.

In Abbildung 6.62 sind Gefäßgrößenmessungen des Querschnitts 1DB0101f dargestellt. Die Probe stammt aus dem mittleren Teil der 65 cm langen Wurzel.

In den Jahren bis 1913 zeigt die Wurzel eine normale Entwicklung. Mit kleinen Gefäßen in den Anfangsjahren des sekundären Wurzelwachstums und Gefäßgrößen

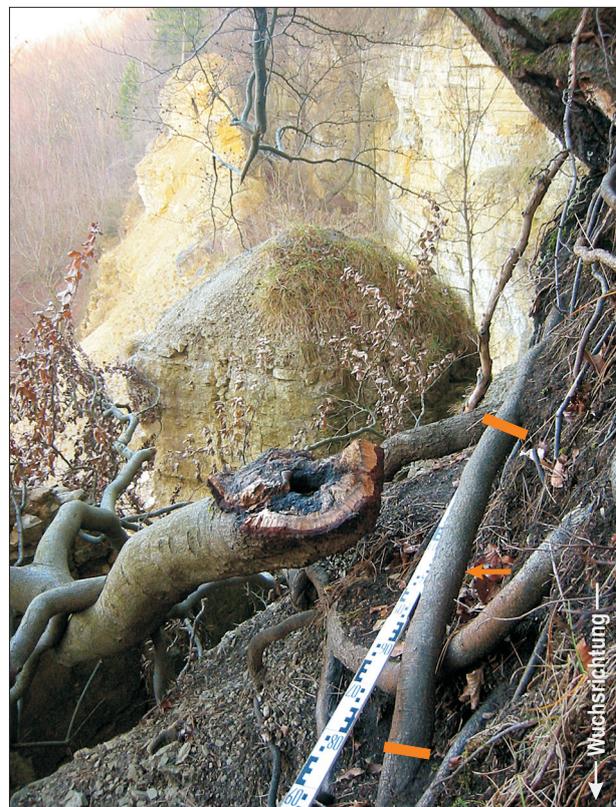


Abb. 6.61: Standort SDB0101, Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge) die Balken markieren den entnommenen Wurzelstrang SDB0101f (Pfeil).

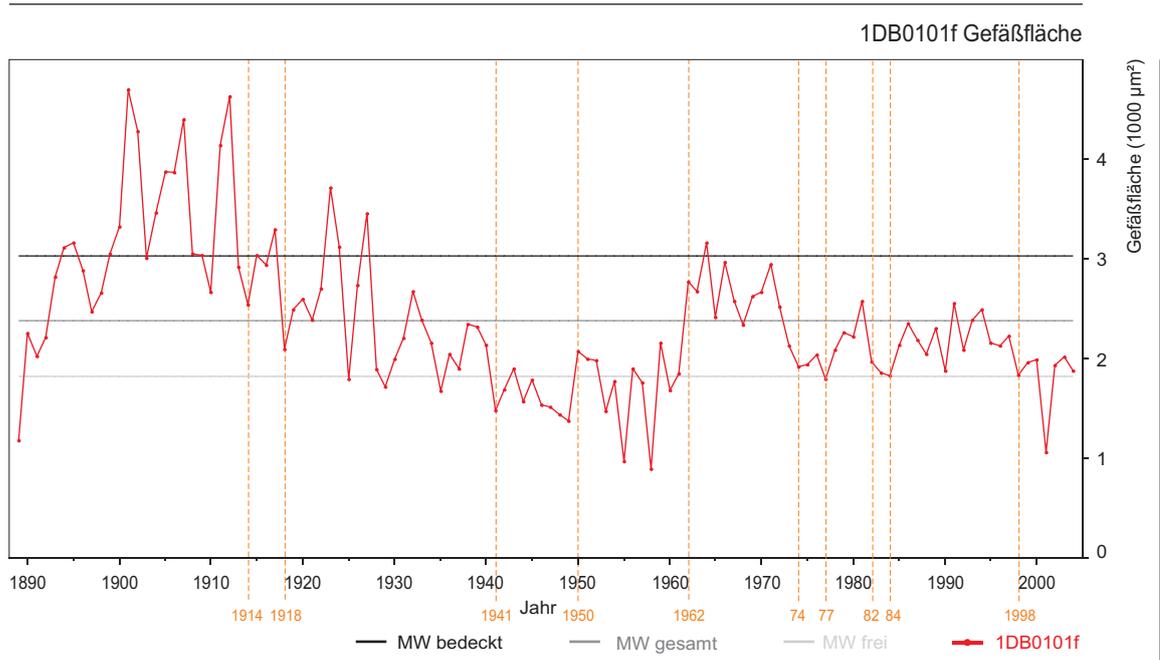
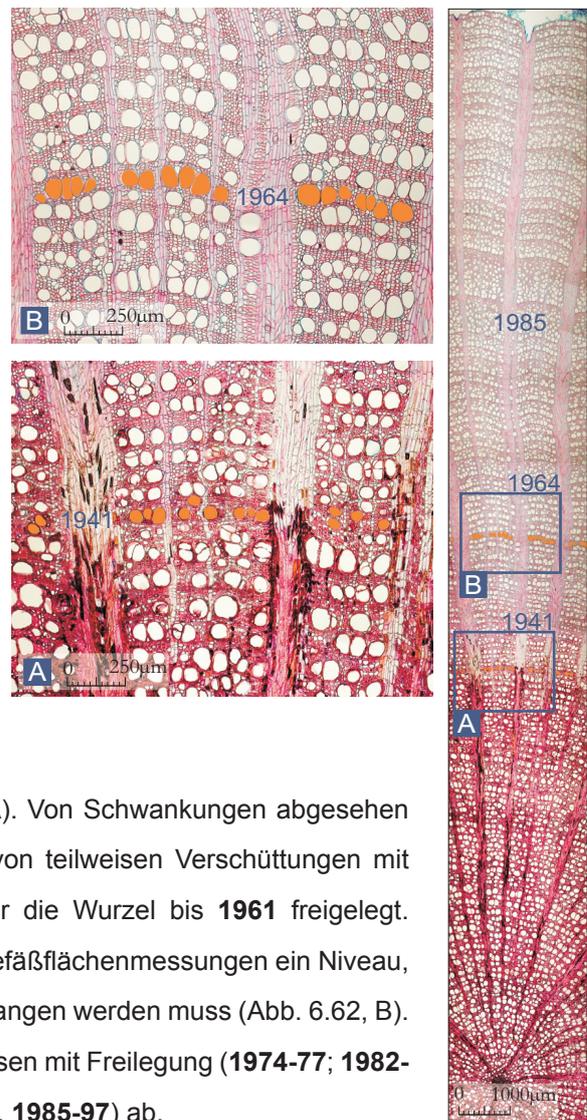


Abb. 6.62: Die Kurve zeigt die Entwicklung der Gefäßfläche von 1DB0101f mit Mittelwerten für den bedeckten Zeitabschnitt der Kurve (MW bedeckt), für die gesamte Kurve (MW gesamt) und für die reingelegten Zeiträume von 1DB0101f (MW frei). Nach kontinuierlichen Abtrag, Freilegung in den Jahren 1941 bis 1961 von Schwankungen abgesehen. Erneute Bedeckung 1962 bis 1972, danach Wechselspiel zwischen Bedeckung und Freilegung von 1973 bis 1997. Aktuelle Freilegung erfolgte 1998.

Rechts: Deutlich wird die Gefäßflächenreduktion im Jahr 1941, 1964 kommt es zu einem erneuten Anstieg der Lumengröße der Gefäße. Im Jahr 1985 nimmt die Jahrringbreite zu, ebenso das Lumen der Gefäße für mehrere Jahre (vgl. Kurve oben).



in der Folge über  $3000 \mu\text{m}^2$ . Ab **1914** setzt ein kontinuierlicher Abwärtstrend ein, wobei von einer kompletten Freilegung im Jahre **1941** ausgegangen werden kann (Abb. 6.62, A). Von Schwankungen abgesehen (**1950 bis 1953; 1959**), vermutlich die Folge von teilweisen Verschüttungen mit Bodenmaterial bzw. Abdeckung mit Laub, war die Wurzel bis **1961** freigelegt. Mit dem Anstieg im Jahre **1962** erreichen die Gefäßflächenmessungen ein Niveau, bei dem von einer erneuten Bedeckung ausgegangen werden muss (Abb. 6.62, B). In den Jahren **1973 bis 1998** wechseln sich Phasen mit Freilegung (**1974-77; 1982-84**) und einer teilweisen Verschüttung (**1978-81, 1985-97**) ab.

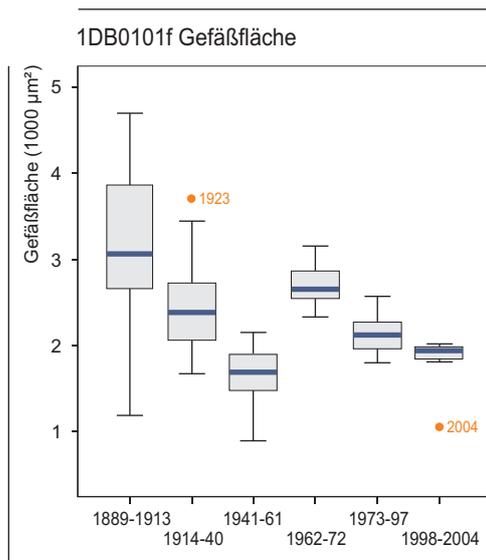


Abb. 6.63: Vergleich der Häufigkeitsverteilung von Gefäßflächenmessungen der Wurzelprobe 1DB0101f, für ermittelte Phasen der Freilegung in den Jahren 1941 bis 1961 und 1998 bis 2004. Deutlich wird die zwischenzeitliche Wiederbedeckung in den Jahren 1962 bis 1972. Die kontinuierliche Reduktion der Gefäßflächen wird angesichts der erneuten Bedeckung durch verlagertes Material in zwei Phasen geteilt.

Ab dem Jahre **1998** war diese Wurzel erneut freigelegt (Abbildung 6.63). In Tabelle 6.12 sind die einzelnen Phasen der Freilegung ermittelten extremen Niederschlagsereignissen gegenübergestellt.

Obwohl eine Hangneigung von 58° an diesem Standort existiert, wird eine schnelle Freilegung infolge erosiver Prozesse durch die zahlreich vorhandenen großen und kleinen Wurzelstränge verhindert (Abbildung 6.61). Dies macht auch der gleichmäßig abfallende Kurvenverlauf von 1DB0101f deutlich. Ebenso wird die Möglichkeit einer erneuten Bedeckung begünstigt, da die einzelnen Wurzelstränge herabstürzendes oder abrutschendes Material zurückhalten. Beide Prozesse spiegeln sich im Verlauf der gesamten Kurve wieder.

Tab. 6.12: Übersicht über abgeleitete geomorphologisch wirksame Aktivität (Kluftbildung, Spaltenöffnung, Erosion) am Standort SDB0101 und die Häufigkeit des Auftretens von extremen Niederschlagsereignissen (Jahresangabe, Zusammenstellung der einzelnen Stationen vgl. Anlage 5).

Phasen	Abgeleitete geomorphologische Aktivität	Extreme Niederschlagsereignisse
		Stationen: Worbis, Leinefelde, Bleicherode
1914-1918	Erosion im Zuge einer Hangversteilung	1913, 1917
bis 1941	Erosion, kontinuierliche Freilegung	1923, 1926, 1927, 1933, 1940
1950-1953	teilweise Bedeckung, Erosion	1951, 1952
1962-1972	Erosion, Verschüttung	1961, 1965, 1967, 1969, 1971, 1972
1973-1977	Erosion mit teilweiser Freilegung	1974, 1975, 1976, 1977
1978-1981	Erosion mit teilweiser Verschüttung	1978, 1980, 1981
1982-1984	Erosion mit teilweiser Freilegung	1983, 1984
1985-1997	Erosion mit teilweiser Verschüttung	1988, 1992, 1993, 1994, 1997
1998	erneute Freilegung durch Erosion	1998

## 6.5 Zusammenfassung

Für die erstmalige Verifizierung der Freilegungsreaktion bei Laubhölzern, im speziellen bei *Fagus sylvatica* L., wurden im Rahmen dieser Arbeit von 47 Bäumen insgesamt 344 Wurzelscheiben von 91 Wurzeln entnommen und analysiert. Zudem wurden von 33 dieser Bäume Bohrkern für ergänzende dendrogeomorphologische Untersuchungen entnommen. Die Gesamtzahl der Referenzbäume zur Erstellung der Standortmittelkurven betrug 74.

Um die bisher unbekanntenen Veränderungen im Zellaufbau von Buchen- und Eschenwurzeln zu ermitteln, wurden am Standort Bleicheröder Berge/ Krajaer Kopf zwei Testfelder angelegt. Zu diesem Zweck wurden Wurzeln von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) und *Fraxinus excelsior* (Gewöhnliche Esche) künstlich freigelegt. Für einen Abgleich der Freilegungsreaktion in den Laubholzwurzeln wurden zusätzlich 13 Wurzeln von *Pinus sylvestris* (Waldkiefer) freigelegt. Die Freilegung erfolgte zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Im Testfeld 1 wurden die Wurzeln innerhalb der Vegetationszeit 2003 freigelegt, im Testfeld 2 vor Beginn der Vegetationsperiode 2004. Die Entnahme der Wurzeln erfolgte im Testfeld 1 im Dezember 2004 und im Testfeld 2 im November 2005.

Ein anschließender Vergleich der Reaktionen mit den bekannten holzanatomischen Veränderungen in Koniferenwurzeln (vgl. GÄRTNER 2003) ermöglichte die Bestimmung spezifischer Merkmale in den Buchenwurzeln (*Fagus sylvatica* L.). Die Bestimmung einer eindeutigen Freilegungsreaktion in Eschenwurzeln basierend auf der Analyse der Gefäßgrößenveränderung war nicht erfolgreich. Jedoch deuten holzanatomische Strukturveränderungen im Grundgewebe auf die Möglichkeit von Ansätzen für zukünftige Untersuchungen hin.

Da sich die Rotbuche zudem als dominierende Baumart an der Wellenkalk-Schichtstufe herausstellte, wurde der Schwerpunkt der Auswertungen ausschließlich auf *Fagus sylvatica* L. gelegt. Dies auch deshalb, weil gerade die Bereiche der initialen Spaltenbildungen an der Trauf in großen Teilen der westlichen Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken durch den Bewuchs mit *Fagus sylvatica* L. geprägt sind.

### *Strukturveränderungen in Abhängigkeit der Tiefenlage*

Der gezielten Auswertung der künstlich freigelegten Wurzeln ging eine Analyse der „normalen“ holzanatomischen Struktur nicht freigelegter Wurzeln aus unterschiedlichen Tiefen voraus.

Strukturen von Wurzeln aus 16 cm Tiefe zeigen ein sehr heterogenes Bild. Die durchschnittlichen Gefäßflächen liegen bei 6000 bis 7000  $\mu\text{m}^2$  und schwanken sehr stark. Einzelgefäße, in der Regel nur Frühholzgefäße, können Flächengrößen bis zu 14000  $\mu\text{m}^2$  erreichen. Die Frühholzgefäße zeigen eine deutlich ovale Form. Die Zellwände des Grundgewebes sind dünnwandig, Jahringgrenzen sind nur schwer auszumachen und auskeilende Jahrringe treten vermehrt auf.

Bei Proben aus einer Tiefe von 10 cm ist das Jahringbild deutlich homogener, dies ist auf einen zahlenmäßigen Zuwachs an Gefäßen, vor allem Spätholzgefäßen und Grundgewebezellen zurückzuführen. Weitere Veränderungen zeigen sich in der Zunahme der Zellwanddicke

bei den Grundgewebezellen und der damit verbundenen Reduzierung des Zelllumens. Die durchschnittlichen Gefäßgrößen liegen bei ca. 4000  $\mu\text{m}^2$ . Von Schwankungen abgesehen sind Jahrringgrenzen gut erkennbar.

Ab einer Tiefe von 4 cm ist die durchschnittliche Gefäßgröße (3000 - 3500  $\mu\text{m}^2$ ) kleiner als bei den tiefer liegenden Proben. Die Form der Frühholzgefäße ist eher gerundet als oval. Die Zunahme von Fasertracheiden und Librifasern lässt das Grundgewebe dichter erscheinen. Der Anteil an Parenchymzellen ist nur gering reduziert. Der Anstieg an Faseranteilen im Grundgewebe ist vermutlich Ausdruck von verstärkt einsetzenden mechanischen Belastungen in Kombination mit Temperaturschwankungen, beeinflusst durch den Tagesgang der Bodentemperatur in 4 cm Tiefe. Die Jahrringausprägung kommt der im Stamm sehr nahe, jedoch ist die durchschnittliche Gefäßgröße in der Wurzel immer noch markant größer.

Das Auftreten von stammähnlichen Strukturen in der Wurzel ist somit kein eindeutiges Indiz für eine Freilegung. Allerdings können diese Veränderungen im Jahrringbild bei Einhaltung eines Mindestabstandes von 100 bis 110 cm zum Stammanlauf Rückschlüsse auf die Tiefe der jeweiligen Wurzelprobe geben. Weiterhin wurde deutlich, dass mit abnehmender Distanz zur Bodenoberfläche die Gefäßgrößen im Früh- und Spätholz kleiner werden. Dieses Merkmal ist entscheidend für die Bestimmung der Art der Freilegung (ob schnell oder kontinuierliche). Die Untersuchungen von Strukturveränderungen im Zellaufbau durch künstlich hervorgerufene Freilegung der Wurzeln von Laubhölzern bildete die Grundlage für die Analyse der natürlich freigelegten Wurzeln an der Wellenkalk-Schichtstufe.

#### *Strukturveränderungen als Reaktion auf eine Freilegung*

Anhand der herbeigeführten Freilegung der Wurzeln auf den Testfeldern 1 und 2 konnten Strukturveränderungen aufgezeigt werden, die ausschließlich in freigelegten Laubholzwurzeln von *Fagus sylvatica* L. auftreten. Das ermittelte anatomische Merkmal für eine Freilegung ist die anhaltende Reduzierung der Gefäßgrößen um mehr als 35% im Vergleich zu den Vorjahren.

Anhand der Veränderungen in der Jahrringstruktur, eingeschlossen die Reduzierung der Gefäßgrößen, war es möglich die Art der Freilegung festzustellen. Neben der schnellen Freilegung, bei der die Gefäßgrößenreduktion um mehr als 35% sofort einsetzte und der kontinuierlichen Freilegung mit einer sich langsam entwickelnden Veränderung der Jahrringstruktur (allmähliche Reduzierung der Gefäßgröße) konnte eine weitere phasenweise ablaufende Freilegungsart beschrieben werden.

Die im natürlichen Umfeld freigelegten Wurzeln untermauern die Analyseergebnisse der künstlich freigelegten. Die reduzierte Größe der Gefäßflächen nach einer Freilegung verbleibt auf einem anhaltend niedrigem Niveau. An einigen Beispielen wurde jedoch deutlich, dass dieser Prozess reversibel ist, da es durch verlagertes Material und einer erneuten Abdeckung zu einem Ansteigen der Gefäßgröße kam. Allerdings ist diese Reaktion noch nicht vollständig analysiert und macht somit weitere detaillierte Untersuchungen erforderlich.

### *Prozessrekonstruktion*

Die Anwendung der beschriebenen Größenreduzierung von Gefäßflächen bei *Fagus sylvatica* L. zur Datierung der initialen Phase von Spaltenöffnungen und der Rekonstruktion vergangener und rezenter Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken bildete einen weiteren Schwerpunkt dieser Arbeit.

Um die unterschiedlichen Prozesse zu rekonstruieren, ging der Jahrringauswertung und der holzanatomischen Untersuchung eine detaillierte Geländeansprache in Form einer geomorphologischen Detailkartierung voraus. In die Auswertung flossen Analysen der strukturelle Variationen im Xylem der Wurzeln (Verthyllung, Reduzierung der Gefäßgröße, überwallte Wunden, Reaktionsholzbildung) und des Stammes (Wachstumseinbrüche, Exzentrizitäten, Zugholz) ein.

Die analysierten Bohrkern der Bäume gaben durch das Auftreten von Exzentrizitäten, die zum Teil mit Reaktionsholzbildung verbunden waren, Hinweise auf Bewegungen des Untergrundes. Jedoch konnte nur anhand der Veränderungen in der Anatomie des Wurzelholzes der genaue Zeitpunkt der Freilegung festgestellt werden. Letztlich war die andauernde Reduzierung der Gefäßgröße um mehr als 35% das ausschlaggebende Merkmal.

Der vielfach erwähnte Zusammenhang von extremen meteorologischen Ereignissen als auslösender Faktor von Massenverlagerungen (BEYER 2002b, PLATE et al. 1993, KRAUTER 1990, SCHMIDT 1988b, SCHMIDT & BEYER 2002, WIECZOREK & GLADE 2005), gab Anlass zu der Ermittlung von extremen Niederschlagsereignissen anhand von Daten des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes und des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Für den Abgleich mit den Analyseergebnissen der Jahrringbreiten- und Gefäßgrößenmessungen waren lange Niederschlagsdatenreihen notwendig. Jedoch standen nicht für jedes Gebiet und jede Station durchgehend Daten zur Verfügung, so musste für entsprechende Zeitabschnitte auf unterschiedliche Stationen zurückgegriffen werden. Die abschließende Gegenüberstellung von rekonstruierten Phasen der geomorphologisch wirksamen Kinematik und den ermittelten extremen Niederschlagsereignissen, ergab jedoch einen deutlichen Zusammenhang. Bewegungsphasen und ermittelte Öffnungszeitpunkte der initialen Spaltenbildungen treten häufig infolge von Starkniederschlagsereignissen auf.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Analyse holzanatomischer Veränderungen in freigelegten Laubholzwurzeln der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.), eine Rekonstruktion und Datierung gravitativer Prozesse ermöglicht. In Kombination mit der Analyse von Jahrringbreitenvariationen im Stamm erlaubt dies eine jahrgenaue Datierung der relativ geringen morphologischen Dynamik der Blockverlagerungen.

Somit ist es erstmals möglich, die Entwicklungsgeschichte von initialen Spaltenbildungen und den damit verbundenen geomorphologischen Prozessabläufen mit Hilfe der holzanatomischen Analyse von Buchenwurzeln zu rekonstruieren.

## 7. Diskussion

Die Rekonstruktion geomorphologischer Prozessabläufe unter Verwendung dendrogeomorphologischer Methoden und der holzanatomischen Analyse von Jahrringen in Buchenwurzeln basierte auf der grundlegenden Untersuchung der unbekanntenen Freilegungsreaktion von Laubholzwurzeln, im Speziellen der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.). Zusätzlich wurden vorhandene Koniferenwurzeln (*Pinus sylvestris*) freigelegt um die Möglichkeit eines Abgleichs der bekannten Freilegungsreaktion (vgl. GÄRTNER 2003) mit den Laubholzwurzeln zu gewährleisten.

Die Wahl der Testfelder wurde durch verschiedene Parameter bestimmt. Notwendig war ein Mischbestand bestehend aus Laub- und Nadelholz in einem Gebiet, welches in den letzten Jahrzehnten keiner intensiven Nutzung durch Forstwirtschaft unterlag. Weiterhin musste die Möglichkeit gegeben sein, in geringer Distanz zueinander alle beschriebenen Baumarten (*Fagus sylvatica*, *Pinus sylvestris*) zu beproben und entsprechende Wurzelteile zu entnehmen. Zudem sollten die Bäume in einem durch Massenverlagerungen unbeeinflussten Untersuchungsgebiet stehen. Auf der Stufenfläche der Bleicheröder Berge/Krajaer Kopf wurden diese Bedingungen vorgefunden,

Nach ersten Beprobungen wurde schnell klar, dass bei den folgenden Freilegungsarbeiten eine erhöhte Vorsicht von Nöten sein musste, da einzelne Wurzelproben durch oftmals nur leichte Verletzungen für die Auswertung nicht mehr brauchbar waren. Es wurde deutlich, dass die Abschottung selbst kleiner Wunden durch die Wurzel in großem Umfang stattfand. Die Veränderung der Gewebestruktur in den entsprechenden Wurzelteilen erfolgte durch Einlagerung von akzessorischen Substanzen in den Zelllumina von Parenchym, Fasern und Gefäßen (BAUCH et al. 1980). Im Zuge der auch als Kompartimentierung bezeichnete Vorgang der Bildung von Thyllen wurden auch Überwallungsränder gebildet (SCHWEINGRUBER 2001). Die wiederholt durchgeführten Kontrollen der einzelnen Testfelder gewährleisteten, dass die künstlich freigelegten Wurzelbereiche nicht wieder durch Laubfall und Windfracht abgedeckt, wurden.

Anhand der holzanatomischen Analyse von bedeckten Teilbereichen der künstlich freigelegten Wurzeln konnten Strukturveränderungen in Abhängigkeit der entsprechenden Tiefenlage festgestellt werden. Wobei die deutliche Ausdifferenzierung eines Jahrrings schon im bedeckten Zustand einsetzte. Die eigentliche Freilegung des einzelnen Wurzelabschnittes zeigte sich jedoch nur in der Reduzierung der Gefäßfläche um mehr als 35 % im Vergleich zu den Vorjahren. Die Strukturveränderungen in Abhängigkeit Tiefenlage sind vergleichbar mit den bisher bekannten Reaktionen in Koniferenwurzeln (GÄRTNER 2003).

Bei der Analyse einzelner, künstlich freigelegter Proben, trat nach langjährigem Wachstum eine Reduktion der Jahrringbreite im ungestörten Bereich der Wurzelprobe auf, obwohl die Tiefe eine Ausdifferenzierung von Jahrringen zulassen müsste (Tiefe 7 cm). Diese Veränderung war jedoch nicht mit einer markanten Abnahme der Gefäßgrößen verbunden. Die Reduktion der Jahrringbreite erfolgte über mehrere Jahre und war nicht an eine Veränderung der Tiefenlage gebunden, da der Dünnschnitt horizontal aus der entsprechenden Probe entnommen wurde. Die Abnahme der Jahrringbreite bei horizontalem Dickenwachstum ist vermutlich die Folge von veränderten Druckbelastungen durch das umgebende Substrat, hervorgerufen durch die Umfangserweiterung der Wurzel. Daraus ergibt sich die mögliche Schlussfolgerung, dass durch die Beschaffenheit des Bodens, der Dichte, dem Skelettanteil und der Auflagemächtigkeit natürliche Variationen in der Jahrringausbildung auftreten können. Jedoch zeigt die relativ gleichbleibende durchschnittliche Größe der Gefäße weiterhin eine Bodenbedeckung an. Die Modifikation der Jahrringstruktur macht zusätzlich deutlich, dass die Jahrringbreite kein eindeutiges Merkmal für eine Freilegung ist.

Einen weiteren möglichen Einfluss auf die Variabilität von Strukturveränderungen haben Temperatur und Niederschlag. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (2002) ist die Temperaturverteilung im Boden von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität abhängig. Beeinflusst werden diese Größen von der Bodenbedeckung, der Bodenfarbe, der Neigung und der Exposition. Die Evapotranspiration der einzelnen Bodentypen sorgt für eine Variabilität der Temperatur in den oberen Bodenschichten (15 - 20 cm) und ist abhängig von der Bodenfeuchte. Tiefer liegende Wurzeln (ab 50 - 60 cm Tiefe) reagieren weniger auf Temperaturschwankungen, dafür mehr auf Niederschläge (KRAUSE 1992). Anhand der Aussagen von BOSSARD (1974) wird die Abhängigkeit des Wurzelwachstums von der Temperatur deutlich, denn das sekundäre Dickenwachstum der Wurzel beginnt erst bei einer Mindesttemperatur im Boden von 10°C bis 13°C. Auch LADEFOGED (1939) stellte bereits fest, dass der Beginn aller Wachstumsvorgänge im Frühjahr von der Temperatur abhängt.

Einen Vergleich nicht freigelegter und freigelegter Wurzelstrukturen von *Fagus sylvatica* L. beschreibt KNY (1908). Er betrachtete jedoch nur die Jahrringausprägung wobei er in den freigelegten Wurzelteilen eine erhöhte Exzentrizität feststellte. Eine in die Tiefe gehende holzanatomische Analyse von Dünnschnitten erfolgte nicht. Mögliche Gründe für die festgestellten Veränderungen, wie z.B. der Einfluss von Temperatur oder Licht, wurden nicht beschrieben.

Der Einfluss von verschiedenen Wellenlängen des Sonnenlichtes auf das Wurzelwachstum beschäftigte FAYLE (1968). Er konnte einen differenzierten Zuwachs bei unterschiedlich farbigen Folien (rot, blau, klar, schwarz) belegen. Wobei das rote Lichtspektrum bei allen untersuchten Arten eine Wachstumssteigerung hervorrief. Die Sonnenstrahlung umfasst ein Spektrum von 290 nm (UV) über den sichtbaren Bereich bis einschließlich des nahen Infrarot (ca. 3000 nm) (MARTIN 2002). Das rote langwellige Lichtspektrum ist Teil der Wärmestrahlung und macht den Einfluss der Temperatur auf das Wurzelwachstum bei dem Versuch von FAYLE (1968) deutlich. Jedoch wurde

die genaue Tiefe bzw. Lage der Wurzel im Bezug zur Bodenoberfläche nicht dokumentiert.

Es ist bekannt, dass Licht und einzelne Farbspektren die morphologische Entwicklung der Pflanzen steuern. Sie lösen die Biosynthese von Pigmenten und anderen Pflanzenstoffen aus und kontrollieren über den Tag-/Nachtwechsel als Zeitgeber die (tageszeitliche) Rhythmik vieler biologischer Prozesse.

Grundsätzlich unterliegen Laubholzwurzeln nach einer Freilegung Veränderungen der unmittelbaren Umwelteinflüsse. Die vermutlich entscheidenden Einflussfaktoren auf das Wurzelwachstum nach einer Freilegung sind Temperatur und Feuchtigkeit. Beide Klimaparameter sind mehr oder weniger aneinander gekoppelt. Wobei besonders die direkte Sonneneinstrahlung die Feuchteverhältnisse aber auch die Temperatur in der direkten Umgebung der Wurzel mit bestimmt. Ob der Haupteinfluss auf die Veränderungen in der Struktur von freigelegten Wurzeln durch die stärkeren Schwankungen der Temperatur oder Feuchteverhältnisse, bzw. noch weitere exogene Faktoren ausgeübt wird, kann erst durch detaillierte Messungen belegt werden. Aufbauend auf Erkenntnisse dieser Arbeit, können im Rahmen von zukünftigen Untersuchungen entsprechende Instrumentierungen erfolgen, die die möglichen Einflüsse exogener Faktoren in langjährigen Messreihen aufzeichnen.

Bei der Anwendung der ermittelten holzanatomischen Strukturveränderungen in Laubholzwurzeln von *Fagus sylvatica* L. zur Rekonstruktion der geomorphologischen Kinematik an der Wellenkalk-Schichtstufe konnten unterschiedliche Freilegungsszenarien ermittelt werden.

Bei der schnellen Freilegung setzte die Gefäßgrößenreduktion um mehr als 35% sofort ein und ist eindeutig zu verifizieren. Die sich langsam entwickelnde Veränderung der Jahrringstruktur (allmähliche Reduzierung der Gefäßgröße) bei kontinuierlicher Freilegung, birgt noch möglichen Untersuchungsbedarf. Obwohl auch hier anhand der 35%igen Reduzierung der Gefäßgrößen der Zeitpunkt der vollständigen Freilegung bestimmt werden kann.

Der unsichere Aspekt bezieht sich auf den Grenzbereich im Niveau der Bodenoberfläche. GÄRTNER (2003) beschreibt bei Koniferen einen Bereich von +/- 0,5 cm unterhalb und oberhalb der Oberfläche, als Unsicherheit des Einsetzens und der maximalen Ausprägung der Reduktion von Frühholzzellen. Eine solch genaue Grenzziehung konnte in dieser Untersuchung nicht ermittelt werden, da die Reaktion der entsprechenden Wurzelstränge knapp unterhalb der Bodenoberfläche (0,5 bis 0,1 cm), vor allem durch die Bedeckung mit Laub mit großer Wahrscheinlichkeit gepuffert wurde.

Ein detaillierteres Wissen um die Abläufe in diesem Grenzbereich der Bodenoberfläche würde die Genauigkeit von Abtragsrekonstruktionen erheblich verfeinern. Weitere Untersuchungen würden das Verständnis von holzanatomischen Strukturveränderungen in Laubholzwurzeln aus diesem Übergangsbereich verbessern.

Die verwendeten Methoden haben gezeigt, dass nur die Anwendung von Dünnschnittpräparaten eine Analyse und Messung von Strukturveränderungen in freigelegten Wurzeln möglich machen. Trotz der teilweise sehr langen Querschnitte (bis zu 72 mm) und der durch die Größe der Deckgläser (75 mm) begrenzten maximalen Länge der Präparate, ist gerade bei Wurzeln mit einem deutlich größeren Durchmesser die Grenze der möglichen Länge des Präparates erreicht. Hier muss eine Zweiteilung des Präparates erfolgen, wobei sich entsprechende Abschnitte möglichst überschneiden sollten, damit keine allzu große Zahl an Jahrringen verloren geht und die gesamte Jahrringstruktur von Zentrum bis zum äußeren Jahrring enthalten ist.

Für die Ermittlung des Zeitpunktes initialer Spaltenbildungen der Wellenkalk-Schichtstufe erwies sich die dendrogeomorphologische Arbeitsweise basierend auf geomorphologischen Methoden (Geländeansprache, Bestimmung von Prozessen, Kartierung) und der Jahrringanalyse als sinnvoller Methodenverbund. Darüber hinaus erwies sich die Verifizierung holzanatomischer Strukturveränderungen in freigelegten Wurzeln als notwendiger Schritt zur genauen Bestimmung der Spaltenöffnung.

## 8. Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse machen deutlich, dass nach einer Freilegung bei Buchenwurzeln (*Fagus sylvatica* L.) eine nachweisbare holzanatomische Strukturveränderung einsetzt. Die Anwendung der entwickelten Methodik zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse an der Wellenkalk-Schichtstufe des Thüringer Beckens macht das Potential der holzanatomischen Analyse deutlich. Wobei nur der Verbund aus einer detaillierten Geländeansprache in Form geomorphologischer Detailkartierungen bzw. einer genauen Standortaufnahme und der dendrochronologischen Datenerhebung eine zeitliche Einordnung der rezenten Prozesse in der Schichtstufenlandschaft ermöglichte.

Die Bestimmung der infolge einer Freilegung der Wurzeln auftretenden Veränderungen der Zellstruktur in den Jahrringen erlaubt die jahrgenaue Datierung des jeweiligen Freilegungszeitpunktes.

Die Erfassung dieses Zeitpunktes ermöglicht zukünftig eine genaue Rekonstruktion der Erosionsleistung verschiedenster Prozesse, z.B. Hochwasserereignisse oder Murgänge, aber auch die Ermittlung der Öffnungsraten von Spaltenöffnungen. Zudem können flächenhafte Abtragsprozesse (Bodenerosion) mit dieser Methode genau quantifiziert werden.

Hiermit wird erstmals ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dem es möglich ist den Beginn bzw. den Ablauf vergangener Prozesse, durch die Buchenwurzeln schnell oder auch kontinuierlich freigelegt wurden zu rekonstruieren.

Trotz der erreichten Genauigkeit dieser Methode muss in der Zukunft eine Verfeinerung im Vordergrund stehen. Dies kann nur durch eine detaillierte Analyse von Wurzeln geschehen, die auf verschiedene Arten freigelegt wurden. Dabei sollte eine umfassende Instrumentierung von bereits freigelegten aber auch noch im Substrat verbliebenen Wurzeln aus unterschiedlichen Tiefen erfolgen. Nur dann sind noch offene Fragen, wie z.B. in welchem Ausmaß und wie schnell sich die Wurzelstruktur im Grenzbereich knapp unter und über der Bodenoberfläche verändert, zu beantworten. Eine Ausweitung auf andere Laubholzarten ist hierbei zwingend erforderlich um die genaue Reaktion anhand unterschiedlicher Baumarten zu verifizieren. Dass es Unterschiede gibt, zeigte schon die Analyse der künstlich freigelegten Wurzeln von Esche (*Fraxinus excelsior*), die eine Strukturänderung weniger in den Gefäßen dafür mehr im Grundgewebe aufwies. Die ausschließliche Konzentration auf *Fagus sylvatica* L. war dennoch die notwendige Konsequenz, da ein großer Teil der Untersuchungsgebiete ausschließlich Buchenbestand aufwies.

Die entwickelte Methode versteht sich nicht als alleinige Möglichkeit geomorphologische Prozesse zu rekonstruieren, sondern sollte möglichst in weitere Verfahren eingebunden werden, um die Dichte der Ergebnisse zu erhöhen bzw. mögliche geomorphologische Veränderungen besser einschätzen zu können.

## 9. Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, E. (1958): Die Sturzfließung am Schickeberg südlich Eschwege. - Notizbl. Hess. L.-A. f. Bodenforsch., 87: p. 172 -187, 1 - 33.
- ACKERMANN, E. (1959): Der Abtragungsmechanismus an der Wellenkalk-Schichtstufe. Bewegungsarten der Massenverlagerungen und morphologische Formen. - Z. f. Geomorph. N.F., 3: p. 193 - 226 u. p. 283 - 304.
- ACKERMANN, E. (1977): Zeitliche und räumliche Gliederung der Rutschfließung an der Wellenkalk-Schichtstufe.- In: Exkursionsführer Geotagung 1977. Göttingen: p. 113 - 120.
- ALESTALO, J. (1971): Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. Fennia 105, Helsinki: pp. 140.
- BARTELS, H. (1993): Gehölkunde - Einführung in die Dendrologie. Ulmer, Stuttgart: pp. 336.
- BAUCH, J., SHIGO, A.L. & M. STARCK (1980): Auswirkungen von Wunden im Xylem von Ahorn und Birkenarten. Holzforsch. 34: p. 153 - 160.
- BAUM, I. & K.-H. SCHMIDT (2001): Temporal classification of mass movements on the Wellenkalk scarp in Thuringia and northern Hesse- possibilities and limitations.- Z. Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 125: p. 25 - 41.
- BAUMGARTNER, A. & H - J. LIEBSCHER (1996): Allgemeine Hydrologie, quantitative Hydrologie. Bornträger, Berlin: pp. 694.
- 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, CH. & L. FILON (1988): Age of landslides along Grana Rivière de la Baleine estuary, eastern coast of Hudson Bay, Quebec (Canada). Boreas 17: p. 289 - 299.
- BERRISFORD, M.S. & J.A. MATTHEWS (1997): Phases of enhanced rapid mass movements in climatic variations during the Holocene: a synthesis.- In: FRENZEL, B. et al. (Hrsg.) (1997): Rapid mass movements as a source of climatic evidence for the Holocene: p. 409 - 440.
- BEYER, I. (2002a): Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken und ihre Abhängigkeit von morphometrischen Steuerungsfaktoren.- Trierer Geogr. Studien, 25: p. 143 - 160.
- BEYER, I. (2002b): Verbreitung und Eigenschaften von Massenverlagerungsgebieten an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken unter besonderer Berücksichtigung geomorphologischer und klimatologischer Steuerungsfaktoren.- Diss., Univ. Halle, Inst. f. Geogr., Halle: pp. 231.
- BEYER, I. & K.-H. SCHMIDT (1999): Untersuchungen zur Verbreitung und Morphometrie von Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe im Raum nördlich von Rudolstadt (Thüringer Becken). Hall. Jb. Geowiss, R.A, 21: p. 67 - 82.
- BEYER, I. & K.-H. SCHMIDT (2002): Quartäre Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schichtstufe im Thüringer Becken - Mechanismen, Eigenschaften und niederschlagsabhängige Verbreitungsmuster. Beiträge zur Geologie Thüringens N.F. 9: p. 341 - 364.
- BEYER, I. & K.-H. SCHMIDT (2003): Schichtstufenlandschaften, In: Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland, Relief, Boden und Wasser. Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin: p. 84 - 87.
- BIDWELL, R.G.S. (1991): Plant Physiology. A Treatise (Steward, F.C. (Hrsg.). Volume X: Growth and Development. Academic Press, San Diego: pp. 572.
- BLUME, H. (1987): Probleme der Schichtstufenlandschaften.- Darmstadt.
- BORTZ, J. (1999): Statistik für Sozialwissenschaftler. Springer, Berlin: pp. 836.
- BOSSHARD, H.H. (1967): Über die fakultative Farbkernbildung. Holz Roh-Werkstoff 25: p. 409 - 416.
- BOSSHARD, H.H. (1974a): Holzkunde I: Mikroskopie und Makroskopie des Holzes. Birkhäuser-Verlag, Basel, Stuttgart: pp. 224.
- BOSSHARD, H.H. (1974b): Holzkunde II: Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser-Verlag, Basel, Stuttgart: pp. 224.
- BOSSHARD, H.H. (1984): Holzkunde, Vol. 2, zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. Birkhäuser, Basel: pp. 312.
- BOSSHARD, H.H. & L. KUCERA (1973): Die dreidimensionale Strukturanalyse des Holzes. I Mitteilung: Die Vernetzung des Gefäßsystems in Fagus sylvatica L. Holz als Roh- und Werkstoff 31: p.437 - 445.

- 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.
- BRÄKER, O.U. (1981): Der Alterstrend bei Jahringdichten und Jahringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Birmensdorf: p. 75 - 102.
- BRAUN, H.J. (1988): Bau und Leben der Bäume. Rombach-Wissenschaften, Freiburg: pp. 295.
- BRAUN, H.J. (1963): Die Organisation des Stammes von Bäumen und Sträuchern. wissenschaftliche Verl.-Ges., Stuttgart: pp. 162.
- BRÄUNING, A. (1995): Zur Anwendung der Dendrochronologie in den Geowissenschaften. In: *Die Erde* 126: p. 189 - 204.
- 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.
- CHATTAWAY, M.M. (1949): The development of tyloses and secretion of gum in heartwood formation. *Aust. J. Sci. Res.* 2: p. 227 - 240.
- COOK, E. R. AND KAIRIUKSTIS, L. A. (Eds) (1990). *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental science*. International Institute for Applied Systems Analysis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: pp. 394.
- COOK, E.R. (1985): A time-series analysis approach spline to tree ring standardization. Ph. D. diss. Univ. of Arizona, Tucson: pp. 175.
- CORONA, E. (1986): Dendrochronologia: Principi e applicazioni. Attidel seminario tenuto a Verona nei giorni 14 e 15 novembre 1984. Verona instituti italiano di dendrochronologia: pp. 103.
- 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.
- 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: J.S. Dean, D.M. Meko, and T.W. Swetnam, eds., *Tree Rings, Environment, and Humanity*. Radiocarbon: p. 671-678.
- DEMEK, J. (1976): *Handbuch der geomorphologischen Detailkartierung*.- Wien.
- DENNELER, B. & F.H. SCHWEINGRUBER (1993): Slow mass movement. A dendrogeomorphological study in Gams, Swiss Rhine Valley. *Dendrochronologia* 11: p. 55 - 67.
- DIKAU, R., D. BRUNSDEN, L. SCHROTT & M.-L. IBSEN (1996): *Landslide Recognition*. Wiley, Chichester: pp. 251.
- DOCKTER, J. & A. STEINMÜLLER (1993): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25.000 von Thüringen Blatt 4530 Nordhausen (Süd).- Weimar.
- 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.
- DUJESIEFKEN, D. & W. LIESE (1990): Einfluss der Verletzungszeit auf die Wundheilung bei Buche (*Fagus sylvatica* L.). *Holz als Roh- u. Werkstoff*, 48: p. 95 - 99.
- DUJESIEFKEN, D., EBENRITTER, S. & W. LIESE (1989): Wundreaktion im Holzgewebe bei Birke, Buche und Linde. *Holz als Roh- u. Werkstoff*, 48: p. 495 - 500.
- DWD (1999-2004): *Witterungsreport. Jahresausgabe*, Deutscher Wetterdienst, Geschäftsfeld Klima- und Umweltberatung. DWD 1999-2004, Offenbach-Main.
- 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.
- ECKSTEIN, D. & U. SASS (1994): Bohrwiderstandsmessungen an Laubbäumen und ihre holzanatomische Interpretation. *Holz als Roh- und Werkstoff* 52: p. 279 - 286.
- ELLENBERG, H. (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen aus ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. Ulmer, Stuttgart 1996: pp. 1095.
- ELLENBERG, H., MAYER, R. & J. SCHAUERMANN (Ed) (1986): *Ökosystemforschung. Ergebnisse des Sollingprojekts*. Stuttgart.

- ENSTONE, D.E. & C.A. PETERSON (2001): Anatomy of seedling tap roots of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). In: *Trees* 15: p. 98 - 111.
- EPOCH (EUROPEAN COMMUNITY PROGRAMME) (1993): Temporal Occurrence and Forecasting of Landslides in the European Community, (Ed. J-C. Flageollet). 3 Volumes, Contract No. 90 0025.
- ESAU, K. (1969): The phloem. Gebr. Borntraeger, Berlin: pp. 505.
- ESCHRICH, W. (1995): Funktionelle Pflanzenanatomie. Springer Verlag, Heidelberg: pp. 393.
- ESPER, J. & H. GÄRTNER (2001): Interpretation of Tree-Ring Chronologies. In: *Erdkunde* 55 (3).
- ETTER, H. (1949): Über die Ertragsfähigkeit verschiedener Standortstypen. *Mitt. Eidgenöss. Anst. forstl. Vers. wes.*, 26: p. 91 - 152.
- FANTUCCI, R. & A. McCORD (1995): Reconstruction of landslide dynamic with dendrochronological methods. *Dendrochronologia* 13: p. 1 - 22.
- FAYLE, D.C.F. (1968): Radial Growth in Tree Roots: Distribution, Timing and Anatomy. University of Toronto, Faculty of Forestry Technical Report 9: pp. 183.
- 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.
- FORSTER, T., SCHWEINGRUBER, F.H. & B. DENNELER (2000): Increment puncher. A tool for extracting small cores of wood and bark from living trees. - *IAWA Journal* 21, 2: p. 169- 180.
- FREUND, H. (1951): *Handbuch der Mikroskopie in der Technik*. Band 4, Teil 1, Umschau Verlag, Frankfurt: pp. 78.
- FRITTS, H.C. (1976): *Tree Rings and Climate*. Academic Press, London: pp. 567.
- GARCIA G. & ECKSTEIN, D. (2003): Climate signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology* 23: p. 497 - 50.
- GARCIA GONZALEZ, I., FONTI, P. (2006). Selecting earlywood vessels to maximize their environmental signal. *Tree Physiology* 26 (9): p. 1289 - 1296.
- GÄRTNER, B.L. (1995): Patterns of xylem variation within a tree and their hydraulic and mechanical consequences. In: *Plant Stems: Physiology and Functional Morphology*. Academic Press, San Diego: pp. 440.
- GÄRTNER, H. (2003): Holzanatomische Analyse diagnostischer Merkmale einer Freilegungsreaktion in Jahrringen von Koniferenwurzeln zur Rekonstruktion geomorphologischer Prozesse. *Dissertationes Botanicae*, Band 378: pp. 118
- GÄRTNER, H. (2006a): Glacial Landforms, Tree Rings: Dendrogeomorphology. In: Elias, S.A. (Ed.): *Encyclopedia of Quaternary Sciences*, 4 Volumes, Elsevier.
- GÄRTNER, H. (2006b): Tree roots – Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. *Geomorphology*.
- GÄRTNER, H., ESPER, J. & K. TREYDTE (2004): Geomorphologie und Jahrringe - Feldmethoden in der Dendrogeomorphologie. *Schweiz. Z. Forstwes.* 155, 6: p. 198 - 207.
- GÄRTNER, H., SCHWEINGRUBER, F.H. & R. DIKAU (2001): Determination of erosion rates by analyzing structural changes in the growth pattern of exposed roots. *Dendrochronologia* 19 (1): p. 81 - 91.
- 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: p. 39 - 45.
- GERS, E., FLORIN, N., GÄRTNER, H., GLADE, T., DIKAU, R. & F.H. SCHWEINGRUBER (2001): Application of shrubs for dendrogeomorphological analysis to reconstruct spatial and temporal landslide movement patterns. A preliminary study. In: Dikau, R.; Schmidt, K.-H. (Eds.): *Mass Movements in South, West and Central Germany*. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplement 125: p. 163 - 175.
- GLADE T., ANDERSON M. & M.J. CROZIER (Eds) (2005): *Landslide hazard and risk*.- Wiley: pp. 803
- GROSSER, D. (1977): *Die Hölzer Mitteleuropas*. Springer Verlag, Berlin: pp. 208.
- GRUNERT, J. & V. SCHMANKE (1997): Hangstabilität im Südwesten Bonns.- *Geogr. Rdsch.*, 49, 10: p. 584 - 590.
- HANSEN, J. (2002): Untersuchung von Jahrringen ausgewählter Eichen des Hardtwaldes (Elsaß, Frankreich): Quantifizierung von Gefäßstruktur und Radialzuwachs mit Hilfe von Auflichtmikroskopie und Bildanalyse.
- HARTIG, R. (1869): Das Aussetzen der Jahrringe bei unterdrückten Stämmen. In: *Zeitung des Forstlichen Jagdwesen* 1: p. 471 - 476.

- HARTIG, R. (1882): Ueber die Vertheilung der organischen Substanz, des Wassers und des Luftraumes in den Bäumen, und die Ursache der Wasserbewegung in transpirierenden Pflanzen. Julius Springer, Berlin: pp. 112.
- HARTIG, R. (1885): Das Holz der deutschen Nadelwaldbäume. Julius Springer, Berlin.
- HARTIG, R. & R. WEBER (1888): Das Holz der Rothbuche in anatomisch-physiologischer, chemischer und forstlicher Richtung. Julius Springer, Berlin: pp. 238.
- 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: pp. 412.
- 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.
- HEIKKINEN, O. (1994): Dendrochronology for the dating of land surfaces. In: Beck, C. (ed.) (1994): Dating in Exposed and Surface Context. University of New Mexico Press, Albuquerque: p. 213 - 235.
- HEINRICH, D. & M. HERGT (1994): dtv-Atlas zur Ökologie. Deutscher Taschenbuch Verlag, München: pp. 286.
- HENDL, M. (1995): Klima. In: Liedtke, H. & J. Marcinek (Hrsg.) (1995): Physische Geographie Deutschlands. Justus Perthes, Gotha: p. 24 - 119.
- HILBIG, W. (1971): Kalkschuttgesellschaften in Thüringen. In: Hercynia N.F. Leipzig 8: p. 85 - 95.
- HODICK, D., BUCHEN, B. & A. SIEVERS (1998): Stalolith Positioning by Microfilaments in Chara Rhizoids and Protonemata. In: Advanced Space Research 21 (8/9). p. 1183 - 1189.
- HOLDHEIDE, W. (1951): Anatomie mitteleuropäischer Gehölzrinden. In: Freund, H. Handbuch der Mikroskopie in der Technik. Umschau Verlag, Frankfurt a. M., p. 193 - 367.
- 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. Springer, Berlin: pp. 243.
- HUTCHINGSTON, J.N. (1988): General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology.- Proceed. 5th Int. Symp. Landslides in Lausanne, 1: p. 3 - 35.
- JACCARD, P. (1912): Über abnorme Rothholzbildung. Ber. Dt. bot. Ges. 30: p. 670 - 702.
- JACCARD, P. (1917): Anatomische Struktur des Zug- und Druckholzes bei waagerechten Ästen von Laubhölzern. Vierteljahresschr. Naturf. Ges. Zürich 42: p. 303 - 318.
- JACOB, F., JÄGER, E. J. & E. OHMANN (1994): Botanik. Fischer, Jena: pp. 609.
- JOHNSEN, G. (1974a): Blockbewegungen an der Wellenkalktrauf Thüringens.- Z. geol. Wiss., 2, 4: p. 449 - 455.
- JOHNSEN, G. (1974b): Baumaßnahmen an der Wellenkalksteilstufe Thüringens.- Bauplanung-Bautechnik, Jg. 28, 4: p. 180 - 182.
- JOHNSEN, G. (1981): Bewegungsmessungen im Bereich von Blockrutschungen an der Röt/Wellenkalk-Schichtstufe Thüringens.- Zschr. f. angew. Geol., 27, 8: p. 386 - 392.
- JOHNSEN, G. (1984a): Beobachtungen an einem aktiven Bergrutsch an den Bleicheröder Bergen bei Kraja.- Beitr. z. Heimatkunde a. Stadt u. Kreis Nordhausen, 9: p. 26 - 34.
- JOHNSEN, G. (1984b): Hangbewegungen vom Block-Typ östlich Berggießhübel.- In: Ingenieurgeologische Untersuchungen im Fels, Vortrags- und Exkursionstagung der GGW 1984 in Freiberg: p. 29 - 38.
- 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.
- JOHNSEN, G. & K.J. KLENGEL (1973): Blockbewegungen an der Wellenkalksteilstufe Thüringens in ingenieurgeologischer Sicht.- Engineering Geology, 7: p. 231 - 257.
- KAUSSMANN, B. & U. SCHIEWER (1989): Funktionelle Morphologie und Anatomie der Pflanzen. Fischer, Jena: pp. 465.

- KIRBIS, G. (1950): Beiträge zur Morphologie der Goburg.- Gött. Geogr. Abh., 5: p. 1 - 42.
- KLINK, H.-J. & S. SLOBODA (1995): Vegetation. In: Liedtke, H & J. Marcinek (1995): Physische Geographie Deutschlands. Justus Perthes, Gotha: p. 157 - 191.
- 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.
- KÖSTLER, J.N., BRÜCKNER, F. & H. BIBELREITER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Pare, Hamburg & Berlin: pp. 284.
- KOZLOWSKI, T.T. & S.G. PALLARDY (1997): Physiology of woody plants. Academic Press, San Diego: pp. 411.
- 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. (1992): Ganzbaumanalyse von Eiche, Buche, Kiefer und Fichte mit dendroökologischen Methoden unter besonderer Berücksichtigung von Klima-Wachstums-Beziehungen und Weiserjahren. Dissertation, Universität Hamburg: pp. 163.
- 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.
- KRAUTER, E. (1990): Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen. In: Grundbau-Taschenbuch, 3. Aufl.: p. 1 - 46.
- KRÜMLING, H., E. TORNACK, J. WIEFEL & K. WUCHER (1975): Massenverlagerungen an der Röt-Muschelkalk-Schichtstufe Nordwest-Thüringens.- Zschr. angew. Geol., 21: p. 552 - 558.
- KUTSCHERA, L. & E. LICHTENEGGER (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Stocker, Graz: pp. 604.
- KUTSCHERA, L., SOBOTIK, M. & E. LICHTENEGGER (1992): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Bd. 2: Pteridophyta und Dicotyledoneae <Magnoliopsida>. Teil 1: Morphologie, Anatomie, Ökologie, Verbreitung, Soziologie, Wirtschaft; Teil 2: Anatomie. Fischer, Stuttgart: Teil1, pp. 261. Teil 2, pp. 851.
- KUTSCHERA, L., SOBOTIK, M. & E. LICHTENEGGER (1997): Bewurzelung von Pflanzen in den verschiedenen Lebensräumen. Publ. d. Botan. AG O.Ö. Landesmuseum, Linz: pp. 331.
- LADEFOGED, K. (1939): Untersuchungen über die Periodizität im Ausbruch und Längenwachstum der Wurzeln bei einigen unserer gewöhnlichen Waldbäume. pp. 222.
- LAMARCHE, V.C. (1961): Rate of slope erosion in the White Mountains, California. Geological Society of America Bulletin, 72: p.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): p. 148 - 149.
- 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.
- LANGBEIN, R., PETER, H.U. & H.J. SCHWAHN (1982): Karbonat- und Sulfatgesteine.- Leipzig.
- LARCHER, W. (1987): Stress bei Pflanzen. Naturwissenschaften 74: p. 158 - 167.
- LARCHER, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen: Leben, Leitung und Stressbewältigung der Pflanzen in der Umwelt. Ulmer, Stuttgart: pp. 394.
- LIBBERT, E. (1987): Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. Gustav Fischer, Stuttgart: pp. 434.
- LIEDTKE, H & J. MARCINEK (2002): Physische Geographie Deutschlands. 3. Aufl., Gotha: pp. 786.
- 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.
- LOHMANN, U. (2003): Holz Lexikon. Band 2, DRW-Verlag, Leinfelden - Echterdingen: pp. 689.

- LOTZE, F. (1938): Das Problem der „Saxonischen Faltung“. Geotekt. Forsch.,3, Berlin: p. 72 - 84.
- LYR, H. (1996): Effect of the root temperature on growth parameters of various European tree species. In: Ann Sci For 53: p. 317 - 323.
- MARIN, P. & L. FILION (1992): Recent dynamics of subarctic dunes as determined by tree-ring analysis of white spruce, Hudson Bay, Québec. Quarternary Research, 38: p. 316 - 330.
- MARTIN, CH. (2002): Lexikon der Geowissenschaften. Band 5, Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg: pp. 488.
- METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR (1953): Klima-Atlas für das Gebiet der DDR. Berlin.
- METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR (1971-1988): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch (1971-1988). Institut für Wasserwirtschaft. Akademie-Verlag, Berlin.
- METEOROLOGISCHER DIENST DER DDR (1978): Klimatologische Normalwerte für das Gebiet der DDR (1901-1950). Akademie-Verlag, Berlin, pp.148
- METEOROLOGISCHER UND HYDROLOGISCHER DIENST DER DDR (1987): Klimadaten der DDR. Klimatologische Normalwerte (1951-1980). Reihe B, Bd 14, Potsdam: pp. 111.
- MITSCHERLICH, G. (1975): Wald, Wachstum und Umwelt. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Sauerländer, Frankfurt a.M.: pp. 352
- NELSON, C.D. (1964): Production and translocation of photosynthate - C 14 in conifers. In: Formation of Wood in Forest Trees, Zimmermann, M.H. (ed.), Academic Press, New York: p. 243 - 257.
- 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.
- NÖRDLINGER, H. (1872): Der Holzring als Grundlage des Baumkörpers. Cotta'scher Verlag, Stuttgart, 47.
- NULTSCH, W. (1991): Allgemeine Botanik: Kurzes Lehrbuch für Mediziner und Naturwissenschaftler. Thieme, Stuttgart: pp. 560.
- PARK, Y.-L. (2000): Zur Auswirkung von Umwelteinflüssen auf das Wachstum von Fichten (*Picea abies* L. Karst.) auf der Grundlage bildanalytischer Verfahren zur Quantifizierung der Zellstruktur an Holzquerschnittsflächen. Diss. Univ. Freiburg. Schriftenreihe Freiburger forstliche Forschung: pp. 198.
- PASEK, J. (1974): Haupttypen und Ursachen der Hangbewegungen.- Zschr. Geol. Wiss., Bd. 2, 4, Berlin: p. 315 - 324.
- PATZELT, G. (1994): Streifzüge durch die Erdgeschichte Nordwest-Thüringens. Geologischer Abriss und Exkursionsführer. Pertes, Gotha: pp. 96.
- PETERS, R. (1997): Beech Forests. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: pp. 169.
- PLASSE, J. (1923): Bergstürze im Unteren Muschelkalk bei Jena und Kahla.- Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft zu Jena, 37: p. 42 - 52.
- 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): Basipedal Auxin Transport is Required for Gravitropism in Roots of Arabidopsis. In: Plant Physiology 122: p. 481 - 490.
- RAU, D., SCHRAMM, H. & J. WUNDERLICH (1995): Die Leitbodenreformen Thüringens. Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, H.3, - Weimar.
- RAVEN, P.H., EVERT, R.F. & S.E. EICHHORN (2000): Biologie der Pflanzen. de Gruyter, Berlin: pp. 1032.
- 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 wodd science, Springer, new York: pp.154.
- RÖHRIG, E. (1966): Mischbestände aus Edellaubbaumarten und Buche. Forst- Holzwirt, 3: p. 59 - 64.
- RÜGER, L. (1937): Der Wellenkalk.- Ber. z. Geolog. v. Thüringen, Bd IV, H.1 - 6: p. 137 - 155.
- RUSSELL, R.S. (1977): Plant root systems: Their function and interaction with the soil. McGraw-Hill, Maidenhead, England: pp. 298.
- SACHS, L. (1999): Angewandte Statistik. Anwendung statistischer Methoden. Springer, Berlin: pp. 881.
- SAHLING, I. (2002): Möglichkeiten der dendrogeomorphologischen Analyse der Öffnungsraten von Spalten an der Wellenkalk-Schichtstufe im südlichen Thüringer Becken.- Dipl.-Arb., Univ. Halle. Inst. f. Geogr. (unveröff.).

- SAHLING, I., K.-H. SCHMIDT & GÄRTNER, H. (2003): Dendrogeomorphological analysis of the enlargement of cracks at the Wellenkalk-scarp in the southern Thuringia Basin. – Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment: 32, 125-130, Jülich.
- SASS, U. (1993): Die Gefäße der Buche als ökologische Variable. Bildanalytische Erfassung, dendroklimatologische Prüfung, ökologische Bewertung. Diss., Univ. Hamburg, Fachb. Biologie, Hamburg: pp. 172.
- SASS, U. & D. ECKSTEIN (1994): Preparation of large thin sections and surfaces of wood for automatic image analysis. *Holzforschung* 48 (2): p. 117 - 118.
- SASS, U. & D. ECKSTEIN (1995): The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation. *Trees* 9 (5): p. 247 - 252.
- SCHACHT, H. (1860): *Der Baum. Studien über Bau und Leben der hölzernen Gewächse.* Müller, Berlin: pp. 378
- SCHAEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde.* Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg: pp. 593.
- SCHMID, D. & F.H. SCHWEINGRUBER (1995): Datierung und Nachweis von Rutschungen mit Hilfe von Jahrringen. Eine dendrogeomorphologische Studie im Rutschungsgebiet Brunjini, Oberwallis. Schweiz. Z. Forstwes. 146, 8: p. 641–659.
- SCHMID, R. & R.D. MACHADO (1968): Pit membranes in hardwoods - fine structure and development. *Protoplasma* 66: p. 185 - 204
- SCHMIDT, K.-H. (1988a): Die Reliefontwicklung des Colorado Plateaus.- *Berliner Geogr. Abh.*, 49: pp. 1 - 183.
- SCHMIDT, K.-H. (1988b): Die Wellenkalkschichtstufe in Nordhessen.- *Ber. dt. Landeskunde*, 62: p. 337 - 355.
- SCHMIDT, K.-H. & I. BEYER (2001): Factors controlling mass movement susceptibility on the Wellenkalk-scarp in Hesse and Thuringia.- *Z Geomorph. N.F., Suppl.-Bd. 125*, Berlin, Stuttgart: p. 43 - 63.
- SCHMIDT, K.-H. & I. BEYER (2002): High Magnitude Landslide-Events on a Limestone-Scarp in Central Germany - Morphometric Characteristics and Climatic Controls. *Geomorphology* 49: p. 323 - 342.
- SCHNELLE, M.A., FEUCHT, J.R. & J.E. KLETT (1989): Root systems of trees - facts and fallacies. *J. Arboriculture* 15 (9): p. 201 - 05.
- SCHULZ, H. (1957): Der Anteil der einzelnen Zellarten an dem Holz der Rotbuche. *Holz als Roh- und Werkstoff* 15: p. 113 - 118.
- SCHUNKE, E. (1968): Die Schichtstufenhänge im Leine-Weser-Bergland in Abhängigkeit vom geol. Bau und Klima.- *Gött. Geogr. Abh.*, 43: pp. 1 - 219.
- SCHUNKE, E. (1969): Die Schichtstufenhänge des Leine-Weser-Berglandes, Methoden und Ergebnisse ihrer Untersuchung.- *Geol. Rdsch.*, 58: p. 446 - 464.
- SCHUNKE, E. & J. SPÖNEMANN (1972): Schichtstufen und Schichtkämme in Mitteleuropa.- *Göttinger Geogr. Abh.*, 60, 65 - 92.
- SCHWEINGRUBER, F.H. (1978): Mikroskopische Holzanatomie. Formenspektren mitteleuropäischer Stamm- und Zweighölzern zur Bestimmung von rezentem und subfossilem Material. Hrsg.: Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen. Birmensdorf. Zürcher AG, Zug: 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: ein Atlas zur Bestimmung europäischer Baum-, Strauch- und Zwergstrauchhölzer.* Anatomy of european woods. Hrsg.: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf. Haupt, Bern: pp. 800.
- SCHWEINGRUBER, F.H. (1996): *Tree Rings and Environment.* Dendroecology. Haupt, Bern: pp. 609.
- SCHWEINGRUBER, F.H. (2001): *Dendroökologische Holzanatomie.* Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Haupt, Bern: pp. 472.
- SCHWEINGRUBER, F.H., BÖRNER, A. & E.-D. SCHULZE (2006): *Atlas of Woody Plant Stems, Evolution, Structure, and Environmental Modifications.* Springer, Berlin: pp. 229.
- SDW (2006): *SDW-Schutzgemeinschaft Deutscher Wald. Bauminfoblätter - Die Buche.* Bonn: pp. 4.
- SEIDEL, G. (2003): *Geologie von Thüringen.* Schweizerbart, Stuttgart: pp. 601.
- SEMMEL, A. (1991): *Grundlagen der physischen Geographie: 1. Relief, Gestein, Boden.* Wiss. Buchges., Darmstadt: pp. 148.

- SHRODER, J.F. (1978): Dendrogeomorphological analysis of mass movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary Research* 9: p. 168 - 185.
- SHRODER, J.F. (1980): Dendrogeomorphology: Review and new techniques of tree-ring dating. *Progress in Physical Geography* 4: p. 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.
- SITTE, P., ZIEGLER, H., EHRENDORFER, F. & A. BRESINSKY (Hrsg.) (1998): *Strasburgers Lehrbuch der Botanik*. Fischer, Stuttgart. pp. 1007.
- SOLOMINA, O.N. (2002). Dendrogeomorphology: Research requirements. *Dendrochronologia* 20/1 - 2: p. 233 - 245.
- SPIECKER, H., SCHNICKER, M.G., HANSEN, J., PARK, Y-I., EBDING, T. & W. DÖLL (2000): Cell structure in tree rings: Novel methods for preparation and image analysis of large cross sections. *IAWA Bull* 21: p. 361 - 373.
- STALLINGS, W.S. (1937): Some early papers on tree-rings. *Tree-Ring Bull.* 3.: p. 27 - 28.
- STOKES, A. (1995): The shape of tree root systems affects root wood strength. *Forschungszentrum Karlsruhe/Wissenschaftliche Berichte FZKA 5518*: p. 1 - 53.
- 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.
- STRASBURGER, E. (1891): *Histologische Beiträge*. Band 3. Über den Bau und die Verrichtungen der Leitungsbahnen in den Pflanzen. Jena: pp. 1000.
- 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. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplement* 70: p. 163 - 186.
- STRUNK, H. (1990): Murgänge als Naturgefahren – Frequenzanalysen mit dendrochronologischen Methoden. In: Semmel, A. (Ed.): *47. Deutscher Geographentag Saarbrücken 1989, Tagungsberichte und wissenschaftliche Abhandlungen*.
- STRUNK, H. (1991): Frequency distribution of debris flow in the Alps since the "Little Ice Age". *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Supplement* 83: p. 71 - 81.
- STRUNK, H. (1995): Dendrogeomorphologische Methoden zur Ermittlung der Murfrequenz und Beispiele ihrer Anwendung. *Theorie und Forschung*, Bd. 317, *Geographie* 1, Roderer, Regensburg: pp. 196.
- STRUNK, H. (1997): Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena* 31: p. 137 - 151.
- TAYLOR, J.H. & C.A. PERTERSON (2000): Morphometric analysis of *Pinus banksiana*. Root anatomy during a 3-month field study. *Trees* 14(5): p. 239 - 247.
- THERHORST, B. (1996): Kartierlegende für Massenverlagerungen und Hangformen, Maßstabsbereich 1:10.000 - 1:2.500. (unveröffentlicht), Tübingen.
- THERHORST, B. & D. KIRSCHHAUSEN (2001): Legends for mass movements in the MABIS Project. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl.-Bd.* 125: p. 177 - 192.
- 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): p. 19 - 32.
- TILCH, N. (1999): Rutschungs-Suszeptibilität im südlichen Niedersachsen – Von der Anatomie der Rutschung bei Brunkensen/Alfeld zur Prognose instabiler Hanglagen.- *Braunschweiger Geowissenschaftliche Arbeiten*, 22: p. 1 - 184.
- TIMELL, T.E. (1986): *Compression Wood in Gymnosperms* 2, Springer, Kapitel *Compression Wood in Roots*: p. 930 - 946.
- TROENG, E. & S. LINDER (1982): Gas exchange in a 20-year-old stand of Scots pine. *Physiol. Plant.* 54: p. 7 - 23.
- UNESCO WORKING PARTY FOR WORLD LANDSLIDE INVENTORY (UNESCO) (1993): *Multilingual Glossary for Landslides*.- *Canadian Geotechnical Society*.
- VON GUTTENBERG, H. (1960): Grundzüge der Histogenese höherer Pflanzen. 1. Die Angiospermen. *Handbuch der Pflanzenanatomie*; Bd. 8, Teil 3. Borntraeger, Berlin: pp. 315.

- 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.
- VOSS, W. (2004): Taschenbuch der Statistik. 2. Auflage, Carl Hanser, Leipzig, München: pp. 756.
- WAGENFÜHR, R. (2000): Holzatlas. Fachbuchverlag, Leipzig: pp. 688.
- WALTER, R. (1995): Geologie von Mitteleuropa. 6. Auflage, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: p. 566.
- WATSON, A. (2000): Wind-induced forces in the near-surface lateral roots of radiata pine. In: Forest Ecology and Management 135: p. 133 - 142.
- WEBER, H. (1955): Einführung in die Geologie Thüringens. Berlin: pp. 201.
- WENZEL, B. (1991): Zur Lithostratigraphie und Sedimentologie des Röt und zu den Massenverlagerungen an der Röt-/Muschelkalkgrenze in Nordhessen.- Giessener Geol. Schr., 53: pp. 229.
- WIECZOREK, G.F. & TH. GLADE (2005): Climatic factors influencing occurrence of debris flows. In: Jakob M. & O. Hungr (eds) Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer, Berlin, Heidelberg: p. 325 - 362.
- WIELER, A. (1891): Ueber die Beziehung zwischen Wurzel- und Stammholz. In: Forstliches Jahrbuch: p. 143 - 171.
- WILCOX, H. (1954): Regeneration of injured root systems in noble fir. Bot. Gaz. 116: p. 201 - 234.
- WILES, G. C., CALKIN, P. E., JACOBY, G. C. (1996): Tree-ring analysis and Quaternary geology: Principles and recent applications. Geomorphology 16: p. 259 - 272.
- WUSSOW, G. (1922): Untere Grenze dichter Regenfälle. Met. Z. 39: p. 173 - 180.
- ZIEGENHARDT, W. & J. JUNGWIRTH (1968): Erläuterungen zur geologischen Spezialkarte der Deutschen Demokratischen Republik, Blatt 5231 Plaue.- Berlin.

## 10. Kartenverzeichnis

### Topographische Karten

#### 1:100.000

<b>C 4726 Mühlhausen (Thüringen)</b>	Thüringer LVA, 2. Auflage, 1996
<b>C 5126 Eisenach</b>	Thüringer LVA, 2. Auflage, 1996
<b>C 5130 Erfurt</b>	Thüringer LVA, 1. Auflage, 1992

#### 1:25.000

<b>4529 Bleicherode</b>	Thüringer LVA (Hrsg.): Ausgabe 1993, Stand 1993
<b>4626 Heilbad Heiligenstadt</b>	Thüringer LVA (Hrsg.): Ausgabe 1999, Stand 1999
<b>4627 Leinefelde</b>	Thüringer LVA (Hrsg.): Ausgabe 1997, Stand 1997
<b>4727 Küllstedt</b>	Thüringer LVA (Hrsg.): Ausgabe 1994, Stand 1994
<b>4827 Treffurt</b>	Thüringer LVA (Hrsg.): Ausgabe 1998, Stand 1998

#### 1:10.000

<b>M-32-21-D-b-4 Haynrode</b>	Ministerium f. Nationale Verteidigung-Militärtopographischer Dienst (Hrsg.) Ausgabe 1989, Stand: 1985
<b>M-32-21-D-c-4 Birkungen</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1992, Stand: 1985
<b>M-32-21-D-d-3 Niedersroschel</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1992, Stand: 1985
<b>M-32-21-D-d-4 Deuna</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1992, Stand: 1985
<b>M-32-22-C-a-3 Kraja</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1995, Stand: 1985
<b>M-32-22-C-a-4 Bleicherode</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1995, Stand: 1985
<b>M-32-22-C-c-1 Sollstedt</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1995, Stand: 1985
<b>M-32-22-C-c-2 Obergebra</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1995, Stand: 1985
<b>M-32-22-C-c-3 Vollenborn</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1990
<b>M-32-33-A-b-1 Kalteneber</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1986
<b>M-32-33-A-b-2 Heuthen</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1986
<b>M-32-33-A-b-3 Ershausen</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1986
<b>M-32-33-A-b-4 Großbarloff</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1986
<b>M-32-33-A-d-2 Lengefeld u.Stein</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1986
<b>M-32-33-C-b-2 Treffurt</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1986
<b>M-32-33-C-b-4 Schnellmannshausen</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1987
<b>M-32-33-D-a-3 Falken</b>	Thüringer LVA (Hrsg.) Ausgabe 1993, Stand: 1987

### Geologische Karten

#### 1:400.000

<b>Thüringer Landesanstalt für Bodenforschung Weimar (1994) (Hrsg.): Thüringen Geologische Übersicht 1:400 000.-Aufl., Justus Perthes Verlag Gotha.</b>
---

#### 1:25.000

<b>4528 Worbis</b>	Kgl. Preuss. Geolog. Landesanst.(1853) (Hrsg.).
<b>4529 Bleicherode</b>	Kgl. Preuss. Geolog. Landesanst.(1853) (Hrsg.).
<b>4629 Groß-Keula (Keula)</b>	Kgl. Preuss. Geolog. Landesanst.(1953) (Hrsg.).
<b>4727 Lengenfeld (Küllstedt)</b>	Kgl. Preuss. Geolog. Landesanst.(1902) (Hrsg.).
<b>4827 Treffurt</b>	Kgl. Preuss. Geolog. Landesanst.(1907) (Hrsg.).

---

### **Eidesstattliche Erklärung über selbständige Anfertigung der Arbeit**

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt zu haben.

Die den genutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Halle (Saale), den 12. November 2006

Ingo Sahling

## Anlageverzeichnis

- Anlage 1 Probenübersicht, Liste der Wurzelproben, Referenzbäume und Probenbäume
- Anlage 2 Standortmittelkurven, Referenzkurven
- Anlage 3 Aufnahmebögen, Wurzel (künstlich freigelegt, natürlich freigelegt), Baum
- Anlage 4 SPSS-Datentabellen
- Anlage 5 Niederschlagsdaten für die einzelnen Messstationen
- Anlage 6 Geomorphologische Detailkartierungen der Untersuchungsgebiete
- |               |     |   |
|---------------|-----|---|
| Karte 1       | (A) | Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge)       |
| Karte 2 und 3 | (B) | Vollenborn Ost/West (Dün)               |
| Karte 4       | (C) | Ritterholz (Dün)                        |
| Karte 5       | (D) | Grenzholz (Dün)                         |
| Karte 6       | (E) | Junkerholz, Westerwald (Eichsfeld)      |
| Karte 7       | (F) | Appental, Treffurter Stadtwald (Ringau) |

Gebiet Standort ID	Baumart	Datum Entnahme	Code	Freilegung				Wurzelscheiben freigelegt grenze bedeckt	Dünnschnitte	Weitere Informationen		
				SP	S	K	KÜ					
SDB01 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Spalte NW												
<b>SDB0101</b>	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB0101f</b>	X		X			○	F	+	Spaltenöffnung mit anschließender kontinuierlicher Freilegung durch Erosion
									○	F	+	
									○	F	+	
SDB03 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Referenzstandort												
<b>SDB0301</b>	<i>fagus sylvatica</i>											
SDB04 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Ende der Mauerscholle												
<b>SDB0401</b>	<i>ahorn</i>	26.06.03	<b>SDB0401e</b>	X					○	F	+	Spaltenöffnung mit Bodenüberdeckung, Wurzeln unterlagen nicht extremen Temperaturschwankungen da sie schon noch in einer gewissen Tiefe wuchsen, vermutlich geringere Anzeichen im Zellaufbau für eine Freilegung
									○	M	+	
SDB05 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Spaltenformation												
<b>SDB0501</b>	<i>fagus sylvatica</i>	26.06.03	<b>SDB0501e</b>	X					⊙	F	+++	Spaltenöffnung, teilweise Bodenabtrag, 2-3 m zum Stamm, am nächsten, teilweise Bedeckung
									○	M	++	
									○	F	+	
SDB06 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche												
<b>SDB0601</b>	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0601e</b>				X		○	F	++	künstlich freigelegt am 31.07.03
									○	F	++	
									○	F	+	
									⊙	F	+	
									●	M	++	
									●	F	++	
	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0601f</b>				X		○	F	+	künstlich freigelegt am 31.07.03
									○	M	+	
									○	F	+	
									⊙	F	+	

							4DB0601f	●	M	+	
							5DB0601f	●	F	+	
							6DB0601f	●	M	+	
<b>SDB0604</b>	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0604e</b>			X	0DB0604e	○	M	+	künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0604e	○	F	+	
							2DB0604e	○	F	+	
							3DB0604e	⊙	F	+	
							4DB0604e	●	F	+	
							5DB0604e	●	M	+	
							6DB0604e	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0604f</b>			X	0DB0604f	○	F	++	künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0604f	○	M	++	
							2DB0604f	⊙	F	++	
							3DB0604f	●	M	++	
							4DB0604f	●	M	++	
							5DB0604f	●	F	++	
<b>SDB0605</b>	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0605e</b>			X	0DB0605e	○	F	+	künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0605e	○	F	+	
							2DB0605e	⊙	M	+	
							3DB0605e	●	F	+	
							4DB0605e	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0605f</b>			X	0DB0605f	○	F	+	künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0605f	○	M	+	f teilt sich auf in f und i
							2DB0605f	⊙	F	+	
							3DB0605f	●	F	+	
							4DB0605f	●	M	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0605g</b>			X	0DB0605g	○	M	+	künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0605g	○	M	+	
							2DB0605g	⊙	M	+	
							3DB0605g	●	M	++	
							4DB0605g	●	M	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	<b>SDB0605h</b>			X	0DB0605h	●	M	+	
							1DB0605h	●	M	+	
		01.12.04	<b>SDB0605i</b>			X	0DB0605i	●	M	+	f teilt sich auf in f und i, war ehemals 5DB0605f

<b>SDB0606</b>	<i>fagus sylvatica</i>	02.12.04	<b>SDB0606e</b>			X	0DB0606e	○	M	+	künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0606e	○	M		
							2DB0606e	○	F	+	
							3DB0606e	○	M		
							4DB0606e	⊙	F	+	
							5DB0606e	●	M		
							6DB0606e	●	M	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	02.12.04	<b>SDB0606f</b>			X	0DB0606f	○	M		künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0606f	○	F	+	
							2DB0606f	○	M		
							3DB0606f	⊙	F	+	
							4DB0606f	●	M		
							5DB0606f	●	M		
							6DB0606f	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	02.12.04	<b>SDB0606h</b>			X	0DB0606h	⊙	M	+	künstlich freigelegt am 31.07.03
							1DB0606h	●	M		
							2DB0606h	●	F	+	
							3DB0606h	●	M		
<b>SDB0613</b>	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0613e</b>			X	0DB0613e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0613e	○	F	+	
							2DB0613e	⊙	F	+	
							3DB0613e	●	F	+	
							4DB0613e	●	F	+	
<b>SDB0614</b>	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0614e</b>			X	0DB0614e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0614e	○	F	+	
							2DB0614e	⊙	F	+	
							3DB0614e	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0614h</b>			X	0DB0614h	●	F	+	bei Entnahme freigelegt, 15.11.05
							1DB0614h	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0614i</b>			X	0DB0614i	●	F	+	bei Entnahme freigelegt, 15.11.05
							1DB0614i	●	F	+	
<b>SDB0615</b>	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0615e</b>			X	0DB0615e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0615e	○	F	+	
							2DB0615e	⊙	F	+	

							3DB0615e	●	F	+	
							4DB0615e	●	F	+	
<b>SDB0616</b>	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0616e</b>			X	0DB0616e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0616e	○	F	+	
<b>SDB0617</b>	<i>fagus sylvatica</i>		<b>SDB0617e</b>			X					künstlich freigelegt am 04.03.04
	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0617f</b>			X	0DB0617f	○	F	++	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0617f	○	F	+	
<b>SDB0618</b>	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	<b>SDB0618e</b>			X	0DB0618e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0618e	○	F	+	
							2DB0618e	○	F	+	
							3DB0618e	⊙	F	++	
							4DB0618e	●	F	++	
SDB07 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche											
<b>SDB0701</b>	<i>fagus sylvatica</i>	02.12.04	<b>SDB0701h</b>			X	0DB0701h	○	F	+	künstlich freigelegt am 17.02.04
							1DB0701h	○	M		
							2DB0701h	⊙	F	+	
							3DB0701h	●	M	+	
							4DB0701h	●	M		
							5DB0701h	●	M	+	
	<i>picea abies</i>	02.12.04	<b>SDB0701i</b>			X	0DB0701i	○	M		künstlich freigelegt am 17.02.04
							1DB0701i	○	F	+	
							2DB0701i	○	M		
							3DB0701i	⊙	F	+	
							4DB0701i	●	M		
							5DB0701i	●	M		schlecht für Dünnschnitt
							6DB0701i	●	M	+	
SDB08 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche											
<b>SDB0802</b>	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0802e</b>			X	0DB0802e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0802e	○	F	+	
							2DB0802e	⊙	F	+	
							3DB0802e	●	F	+	
							4DB0802e	●	F	+	
	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0802f</b>			X	0DB0802f	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0802g</b>			X	0DB0802g	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04

							1DB0802g	○	F	+	
							2DB0802g	◉	F	+	
							3DB0802g	●	F	+	
							4DB0802g	●	F	+	
	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0802h</b>			X	0DB0802h	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0802h	○	F	+	
							2DB0802h	◉	F	+	
							3DB0802h	●	F	+	
							4DB0802h	●	F	+	
<b>SDB0803</b>	<i>pinus sylvestris</i>		<b>SDB0803e</b>			X				+	künstlich freigelegt am 04.03.04
	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0803f</b>			X	0DB0803f	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0803f	○	F	+	
							2DB0803f	◉	F	+	
							3DB0803f	●	F	+	
							4DB0803f	●	F	+	
<b>SDB0804</b>	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0804e</b>			X	0DB0804e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0804e	○	F	+	
							2DB0804e	◉	F	+	
							3DB0804e	●	F	+	
							4DB0804e	●	F	+	
							5DB0804e	●	F	+	
<b>SDB0805</b>	<i>pinus sylvestris</i>		<b>SDB0805e</b>			X					künstlich freigelegt am 04.03.04
	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0805f</b>			X	0DB0805f	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0805f	○	F	+	
							2DB0805f	◉	F	+	
							3DB0805f	●	F	+	
							4DB0805f	●	F	+	
							5DB0805f	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	16.11.05	<b>SDB0805g</b>			X	0DB0805g	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0805g	○	F	+	
							2DB0805g	◉	F	+	
							3DB0805g	●	F	+	
							4DB0805g	●	F	+	
							5DB0805g	●	F	+	

<b>SDB0806</b>	<i>pinus sylvestris</i>		<b>SDB0806e</b>			X					künstlich freigelegt am 04.03.04
	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0806g</b>			X	0DB0806g	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0806g	○	F	+	
							2DB0806g	○	F	+	
							3DB0806g	⊙	F	+	
							4DB0806g	●	F	+	
							5DB0806g	●	F	+	
	<i>pinus sylvestris</i>	16.11.05	<b>SDB0806h</b>			X	0DB0806h	●	F	+	bei Entnahme freigelegt, 16.11.05
							1DB0806h	●	F	+	
							2DB0806h	●	F	+	
SDB09 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche											
<b>SDB0901</b>	<i>fraxinus excelsior</i>		<b>SDB0901e</b>			X					künstlich freigelegt am 04.03.04
	<i>fraxinus excelsior</i>		<b>SDB0901f</b>			X					künstlich freigelegt am 04.03.05
	<i>fraxinus excelsior</i>	15.11.05	<b>SDB0901g</b>			X	0DB0901g	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.06
							1DB0901g	○	F	+	
							2DB0901g	⊙	F	+	
							3DB0901g	●	F	+	
							4DB0901g	●	F	+	
	<i>fraxinus excelsior</i>	15.11.05	<b>SDB0901h</b>				0DB0901h	●	F	+	bei Entnahme freigelegt, 15.11.05
<b>SDB0902</b>	<i>fraxinus excelsior</i>	15.11.05	<b>SDB0902e</b>			X	0DB0902e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0902e	○	F	+	
							2DB0902e	⊙	F	+	
							3DB0902e	●	F	+	
							4DB0902e	●	F	+	
<b>SDB0903</b>	<i>fraxinus excelsior</i>	15.11.05	<b>SDB0903e</b>			X	0DB0903e	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0903e	○	F	+	
							2DB0903e	○	F	+	
							3DB0903e	⊙	F	+	
							4DB0903e	●	F	+	
							5DB0903e	●	F	+	
							6DB0903e	●	F	+	
	<i>fraxinus excelsior</i>	15.11.05	<b>SDB0903h</b>			X	0DB0903h	○	F	+	künstlich freigelegt am 04.03.04
							1DB0903h	⊙	F	+	
							2DB0903h	●	F	+	

							3DB0903h	●	F	+	
<b>SDB10</b>		Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche, Hohlform									
<b>SDB1001</b>	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1001e</b>			X	0DB1001e	○	M		Freilegung durch Bodenabtrag am Rand einer Hohlform
							1DB1001e	○	F	+	
							2DB1001e	○	M		
							3DB1001e	○	F	+	
							4DB1001e	○	M		
							5DB1001e	⊙	F	+	
							6DB1001e	●	F	+	
							7DB1001e	●	M		
	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1001f</b>			X	0DB1001f	○	M		
							1DB1001f	○	M		
							2DB1001f	○	F	+	
							3DB1001f	○	M		
							4DB1001f	⊙	M	+	
							5DB1001f	●	M		
							6DB1001f	●	F	+	
							7DB1001f	●	M		
<b>SDB11</b>		Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Weganschnitte									
<b>SDB1101</b>	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1101e</b>			X	0DB1101e	○	F	+	Weganschnitt auf der Stufenfläche, vermutlich freigelegt durch Wegeausbau
							1DB1101e	○	M		
							2DB1101e	○	F	+	
							3DB1101e	○	M		
	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1101f</b>			X	0DB1101f	⊙	F	+	
							1DB1101f	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1101g</b>			X	0DB1101g	⊙	M		
							1DB1101g	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1101h</b>			X	0DB1101h	⊙	M		
							1DB1101h	●	M		
<b>SDB1102</b>	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1102e</b>			X	0DB1102e	○	F	+	Weganschnitt am Waldweg Richtung Bleicherode Stadt
							1DB1102e	○	M		
							2DB1102e	○	F	+	
							3DB1102e	⊙	F	+	
							4DB1102e	●	M		

Gebiet Standort ID	Baumart	Datum Entnahme	Code	Freilegung				Wurzel- scheiben freigelegt grenze bedeckt	Dünn- schnitte	Weitere Informationen
				SP	S	K	KÜ			
								5DB1102e ● F +		
	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	<b>SDB1102f</b>		X			0DB1102f ⊙ F +		
								1DB1102f ● M		
								2DB1102f ● F +		
SDD01 Dün, Ritterholz, Große Wurzel										
<b>SDD0101</b>	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	<b>SDD0101e</b>	X	X			0DD0101e ○	Wurzel überspannt Spalte, Wuchsrichtung von der Scholle Richtung Abrisswand, sehr frei liegend	
								1DD0101e ○ F +		
								2DD0101e ○ F +		
								3DD0101e ○ M		
								4DD0101e ○ M		
								5DD0101e ○ F +		
								6DD0101e ○ M +		
	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	<b>SDD0101f</b>	X				0DD0101f ○ M	Teile von dieser Wurzel kontinuierlich freigelegt durch Erosion	
								1DD0101f ○ F +		
								2DD0101f ⊙ M +		
								3DD0101f ● M		
								4DD0101f ● F +		
<b>SDD0102</b>	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	<b>SDD0102e</b>	X	X			0DD0102e ○ M +	schattige Spalte, Wuchsrichtung Scholle - Abrisswand Freilegungsreaktion wahrscheinlich nicht so ausgeprägt	
								1DD0102e ○ M		
								2DD0102e ○ M +		
								3DD0102e ○ M		
	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	<b>SDD0102f</b>	X				0DD0102f ○ F +		
								1DD0102f ○ M		
								2DD0102f ⊙ M +		
								3DD0102f ● M		
								4DD0102f ● M +		

							5DD0102f	⊙	M		
							6DD0102f	○	M		
<b>SDD0104</b>	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	<b>SDD0104e</b>	X	X		0DD0104e	○	F	+	Spaltenöffnung im Untergrund mit gleichzeitiger Erosion
							1DD0104e	○	M	+	
							2DD0104e	⊙	M	++	
							3DD0104e	●	M		
							4DD0104e	●	F	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	<b>SDD0104f</b>	X	X		0DD0104f	○	M	+	
							1DD0104f	○	F	+	
SDD02		Dün, Ritterholz, 2 m Loch									
<b>SDD0201</b>	<i>fagus sylvatica</i>	10.12.04	<b>SDD0201e</b>	X	X		0DD0201e	○	F	+	Spalte im Untergrund, war durch Boden bedeckt, vermutlich durch Wanderer hineingetreten, dieses Loch liegt an einem viel genutzten Wanderweg
							1DD0201e	○	M		
							2DD0201e	○	M		
							3DD0201e	⊙	F	+	
							4DD0201e	●	M		
							5DD0201e	●	M	+	
	<i>fagus sylvatica</i>	10.12.04	<b>SDD0201f</b>	X	X		0DD0201f	○	M		
							1DD0201f	○	F	+	
							2DD0201f	○	M		
	<i>fagus sylvatica</i>	10.12.04	<b>SDD0201g</b>	X	X		0DD0201g	○	F	+	
							1DD0201g	○			
SDD03		Dün, Ritterholz, Hohlform 10 m Spalte									
<b>SDD0301</b>	<i>fagus sylvatica</i>	10.12.04	<b>SDD0301e</b>	X	X		0DD0301e	○	M	+	bis zu 10 m tiefe und lange Spalte, gemessen mit Laser an zwei Bäumen waren früher mal Stricke, teilweise verwachsen mit der Rinde
							1DD0301e	○	F	+	
							2DD0301e	○	M	+	
							3DD0301e	⊙	F	+	
							4DD0301e	●	M	++	Spalte mit Hohlform als Ausläufer, Wurzel durch nachfolgende Erosion beeinflusst
	<i>fagus sylvatica</i>	10.12.04	<b>SDD0301f</b>	X	X		0DD0301f	○	F	++	f kleiner Durchmesser und nicht so alt
							1DD0301f	○	M		
							2DD0301f	○	M	++	
							3DD0301f	○	F	++	
							4DD0301f	○	M	+	
<b>SDD0302</b>	<i>fraxinus excelsior</i>	10.12.04	<b>SDD0302e</b>	X			0DD0302e	○	F	+	Wurzel überspannte
							1DD0302e	○	M	+	

								2DD0302e	○	F	+	die Spalte im oberen Bereich diagonal
		10.12.04	<b>SDD0302f</b>	X				0DD0302f	○	F	+	
								1DD0302f	○	M	+	
								2DD0302f	○	F	+	
SDD05 Dün, Vollenborn, Spalte												
<b>SDD0501</b>	<i>acer</i>	13.12.04	<b>SDD0501e</b>	X	X			0DD0501e	○	F	+	
	<i>pseudoplatanus</i>							1DD0501e	○	F	+	eine Spalte die von Schutt verdeckt ist, Ausrichtung ist nicht parallel zur Abrisswand, sondern mehr diagonal
								2DD0501e	○	M	+	
			<b>SDD0501f</b>	X	X			0DD0501f	○	F	+	ausgehend von der Wand Richtung Stufenhang, auf der Stufenfläche setzt sich in gleicher Richtung eine ausgeprägte Hohlform fort, die zum Teil in eine initiale Spalte mündet, Freilegung durch Erosion
								1DD0501f	○	M		
								2DD0501f	○	F	+	
<b>SDD0502</b>	<i>fagus sylvatica</i>	13.12.04	<b>SDD0502e</b>	X	X			0DD0502e	○	M	-	an der Abrisswand unterhalb freigelegt, keine Dünnschnitte angefertigt
								1DD0502e	○	M	-	
								2DD0502e	○	M	-	
<b>SDD0503</b>	<i>fagus sylvatica</i>	13.12.04	<b>SDD0503e</b>	X	X			0DD0503e	○	F	++	wächst vom Baum auf der Scholle Richtung Spalte, verschwindet ca. im zweiten Drittel der Spalte, Freilegung kombiniert mit Spaltenöffnung und folgender Erosion in die Spalte hinein, stand unter Zugbelastung
								1DD0503e	○	F	+++	
								2DD0503e	○	M	++	
								3DD0503e	○	F	+++	
	<i>fagus sylvatica</i>	13.12.04	<b>SDD0503f</b>	X	X							wurde nicht entnommen
<b>SDD0504</b>	<i>acer</i>	13.12.04	<b>SDD0504e</b>					0DD0504e	○		-	
	<i>pseudoplatanus</i>							1DD0504e	○		-	am Ausläufer der Scholle, Richtung Osten, hier zeichnet sich eine deutliche Spalte ab
								2DD0504e	○		-	keine Dünnschnitte angefertigt
								3DD0504e	○		-	
			<b>SDD0504f</b>					0DD0504f	○		-	
								1DD0504f	○		-	
								2DD0504f	○		-	
SDD06 Dün, Vollenborn, Absatzscholle												
<b>SDD0601</b>	<i>fagus sylvatica</i>	14.12.04	<b>SDD0601e</b>	X				0DD0601e	○	F	++	Wurzel stand unter Spannung, nach dem Schnitt 2,5 cm auseinander
								1DD0601e	○	F	++	
	<i>fagus sylvatica</i>	14.12.04	<b>SDD0601f</b>	X				0DD0601f	○	F	+	beide Wurzeln in einem Loch an der Abrisswand, wobei die Spaltenöffnung auf einer Absatzscholle zu finden ist
								1DD0601f	○	F	++	
								2DD0601f	⊙	M		
								3DD0601f	⊙	M	++	

							4DD0601f	●	F	+	
SDD07		Dün, Vollenborn, kleine Mauerscholle									
<b>SDD0701</b>	<i>fagus sylvatica</i>	14.12.04	<b>SDD0701e</b>	X	X		0DD0701e	○	F	++	die Wurzel spaltet sich in einen abgestorbenen Strang und auf abgerissen vermutlich bei der Freilegung direkt an der Abrisswand
							1DD0701e	○	F	+	
							2DD0701e	○	F	+	
		14.12.04	<b>SDD0701f</b>	X	X		0DD0701f	○	M	++	dieser Teil der Wurzel wuchs weiter, obwohl der Hauptstrang durch äußere Einflüsse abgerissen bzw. abgestorben ist
							1DD0701f	○	F	++	
SDM01		Dün, Grenzholz, Ahorn an Messstation									
<b>SDM0101</b>	<i>acer</i>		SDM0101								bisher keine Wurzelentnahme
	<i>pseudoplatanus</i>										
SDM03		Dün, Grenzholz, Spalte mit 2 Buchen									
<b>SDM0301</b>	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	<b>SDM0301e</b>	X	X		0DM0301e	●	F	+	
							1DM0301e	⊙	M		
							2DM0301e	○	F	+	
							3DM0301e	○	F	+	
SDM04		Dün, Grenzholz, langgezogene Hohlform									
<b>SDM0401</b>	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	<b>SDM0401e</b>	X		X	0DM0401e	○	M	+	
							1DM0401e	○	F	+	
							2DM0401e	○	F	++	
	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	<b>SDM0401f</b>	X		X	0DM0401f	○	M		
							1DM0401f	○	F	++	
							2DM0401f	○	M		
SDM07		Dün, Grenzholz, Referenzstandort									
<b>SDM0701</b>	<i>fagus sylvatica</i>										
SDE01		Eichsfeld / Westerwald, Junkerholz, abgesperrte Spalte									
<b>SDE0101</b>	<i>fagus sylvatica</i>	20.01.06	<b>SDE0101e</b>	X			0DE0101e	○	F	+	bei der Entnahme festgestellt dass die Wurzel abgestorben ist
							1DE0101e	○	F	+	
							2DE0101e	○	F	+	
<b>SDE0102</b>	<i>fagus sylvatica</i>	20.01.06	<b>SDE0102e</b>	X			0DE0102e	○	F	++	
							1DE0102e	○	F	++	
							2DE0102e	○	F	+++	
SDE08		Eichsfeld, Krombach, Absatzscholle									

<b>SDE0801</b>	<i>fagus sylvatica</i>	23.01.06	<b>SDE0801e</b>	X				0DE0801e	○	F	+	Absatzscholle 1,50 m Absatz
								1DE0801e	○	F	+	
								2DE0801e	○	F	+	
<b>SDE0802</b>	<i>pinus sylvestris</i>	23.01.06	<b>SDE0802e</b>	X				0DE0802e	○	F	+	
								1DE0802e	○	F	+	
								2DE0802e	○	F	+	
SDE10 Eichsfeld / Westerwald, Junkerholz, abgesperrte Spalte												
<b>SDE1001</b>	<i>fagus sylvatica</i>	20.01.06	<b>SDE1001e</b>	X				0DE1001e	○	F	+	kleine Zerrspalte
								1DE1001e	○	F	+	
								2DE1001e	○	F	+	
								3DE1001e	○	F	+	
			<b>SDE1001f</b>	X				0DE1001f	○	F	+	keine Scheibe entnommen
SDH01 Hainich, Naturpark, Panzermulde												
<b>SDH0101</b>	<i>fagus sylvatica</i>	14.12.04	<b>SDH0101e</b>				X	0DH0101e	○	F	+	in einer vermuteten Panzermulde entnommen, im Naturpark Hainich eindeutige anthropogene Hohlform
								1DH0101e	○			
								2DH0101e	○	F	+	
SDT01 Ringau / Treffurt, Appental, kleine Spalte, Hohlformen auf der Stufenfläche												
<b>SDT0101</b>	<i>fagus sylvatica</i>	23.01.06	<b>SDT0101e</b>	X	X			0DT0101e	○	F	+	2 kleine Wurzeln überspannen Zerrspalte, unterliegt Zugbelastungen
								1DT0101e	○	F	+	
								2DT0101e	○	F	+	
			<b>SDT0101f</b>	X	X			0DT0101f	○	F	+	
								1DT0101f	○	F	+	
								2DT0101f	○	F	+	
<b>SDT0102</b>	<i>fagus sylvatica</i>	23.01.06	<b>SDT0102e</b>	X		X		0DT0102e	○	F	+	Wurzel am Rand einer Hohlform freigelegt
								1DT0102e	○	F	+	
								2DT0102e	○	F	+	

Gebiet Standort ID	Baumart	Datum Entnahme	Baumumfang cm	Baumhöhe m	Bohr- richtung	Alter	Alter reduz.	JR aktuell	Referenz	Weitere Informationen
SDB01 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Spalte NW										
SDB0101	<i>fagus sylvatica</i>	25.06.03		5,00	SDB0101a	1906		2002		
					SDB0101b	1906		2002		
					SDB0101c	1909		2002		
					SDB0101d	1903		2002		
SDB03 Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Referenzstandort										
SDB0318	<i>fagus sylvatica</i>	26.06.03	151	23,00	SDB0318a	1872	1874	2002	+	
					SDB0318b	1874	1874	2002	+	
SDB0319	<i>fagus sylvatica</i>	26.06.03	145	22,50	SDB0319a	1885	1885	2002	-	
					SDB0319b	1872	1885	2002	-	
SDB0321	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	159	24,50	SDB0321a	1878	1878	2003	-	
					SDB0321b	1876	1878	2003	-	
SDB0322	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	151	26,00	SDB0322a	1877	1880	2003	+	
					SDB0322b	1880	1880	2003	+	
SDB0323	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	158	25,50	SDB0323a	1862	1866	2003	+	
					SDB0323b	1866	1866	2003	+	
SDB0324	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	127	21,50	SDB0324a	1866	1879	2003	+	
					SDB0324b	1879	1879	2003	+	
SDB0326	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	140	21,00	SDB0326a	1872	1874	2003	-	
					SDB0326b	1874	1874	2003	-	
SDB0327	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	148	26,00	SDB0327a	1880	1880	2003	+	
					SDB0327b	1872	1880	2003	+	
SDB0330	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	185	25,50	SDB0330a	1859	1859	2003	-	Beispiel für Unterdrückung u. dann gesteigertes
					SDB0330b	1855	1859	2003	-	Wachstum nach Holzeinschlag
SDB0333	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	139	19,50	SDB0333a	1929	1929	2003	-	zu kurz
					SDB0333b	1929	1929	2003	-	
SDB0334	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	171	20,50	SDB0334a	1881	1881	2003	+	
					SDB0334b	1868	1881	2003	+	
SDB0335	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	142	19,00	SDB0335a	1883	1883	2003	-	

					SDB0335b	1863	1883	2003	-	
SDB0338	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	151	21,00	SDB0338a	1908	1939	2003	-	zu kurz
					SDB0338b	1939	1939	2003	-	
SDB0339	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	143	18,50	SDB0339a	1899	1899	2003	+	
					SDB0339b	1875	1899	2003	+	
SDB0340	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	177	23,00	SDB0340a	1862	1873	2003	+	
					SDB0340b	1873	1873	2003	+	
SDB0341	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	157	20,00	SDB0341a	1885	1893	2003	-	
					SDB0341b	1893	1893	2003	-	
SDB0342	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	150	20,50	SDB0342a	1875	1875	2003	+	
					SDB0342b	1875	1875	2003	+	
SDB0343	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	162	23,50	SDB0343a	1883	1883	2003	+	
					SDB0343b	1869	1883	2003	+	
SDB0348	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	144	25,00	SDB0348a	1859	1883	2003	+	
					SDB0348b	1883	1883	2003	+	
SDB0349	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	156	21,00	SDB0349a	1871	1871	2003	+	
					SDB0349b	1861	1871	2003	+	
SDB0350	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	176	24,50	SDB0350a	1884	1889	2003	+	
					SDB0350b	1889	1889	2003	+	
SDB0351	<i>fagus sylvatica</i>	07.04.06	171	26,00	SDB0351a	1868		2005	-	
					SDB0351b	1883		2005	-	
SDB0352	<i>fagus sylvatica</i>	07.04.06	142	25,50	SDB0352a	1863		2005	-	
					SDB0352b	1908		2005	-	
SDB0353	<i>fagus sylvatica</i>	07.04.06	151	19,50	SDB0353a	1939		2005	-	
					SDB0353b	1899		2005	-	
SDB04	Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Ende der Mauerscholle									
SDB0401	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	161	12,00	SDB0401a	1804		2003		unter dem Baum öffnet sich die Spalte, eine
					SDB0401b	1799		2003		Verlängerung der Hohlform zw. Abrisswand und
					SDB0401c	1788		2003		Mauerscholle
					SDB0401d	1800		2003		
SDB05	Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Spaltenformation									
SDB0501	<i>fagus sylvatica</i>	05.02.04	192	15,00	SDB0501a	1771		2003		
					SDB0501b	1793		2003		
					SDB0501c	1779		2003		

					SDB0501d	1789		2003		
SDB06		Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche								
SDB0601	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	138	20,00	SDB0601a	1876		2004		
					SDB0601b	1890		2004		
					SDB0601c	1880		2004		
					SDB0601d	1880		2004		
SDB0604	<i>fagus sylvatica</i>	01.12.04	128	18,00	SDB0604a	1887		2004		
					SDB0604b	1883		2004		
					SDB0604c	1886		2004		
					SDB0604d	1884		2004		
SDB0605	<i>fagus sylvatica</i>	02.12.04	160	20,00	SDB0605a	1864		2004		
					SDB0605b	1871		2004		
SDB0606	<i>fagus sylvatica</i>	02.12.04	173	21,00	SDB0606a	1889		2004		
					SDB0606b	1896		2004		
SDB0613	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	104	20,50	SDB0613a	1916		2005		
					SDB0613b	1917		2005		
SDB0614	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	92	19,00	SDB0614a	1876		2005		
					SDB0614b	1890		2005		
SDB0615	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	103	18,00	SDB0615a	1917		2005		
					SDB0615b	1922		2005		
SDB0616	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	145	22,00	SDB0616a	1883		2005		
					SDB0616b	1886		2005		
SDB0617	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	189	24,00	SDB0617a	1856		2005		
					SDB0617b	1857		2005		
SDB0618	<i>fagus sylvatica</i>	15.11.05	152	21,50	SDB0618a	1870		2005		
					SDB0618b	1887		2005		
SDB07		Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche								
SDB0701	<i>pinus sylvestris</i>	15.11.05	141	20,50	SDB0701a	1887		2005		
					SDB0701b	1883		2005		
SDB08		Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche								
SDB0801	<i>pinus sylvestris</i>	17.11.05	159	20,00	SDB0801a	1890		2005		
					SDB0801b	1880		2005		
SDB0802	<i>pinus sylvestris</i>	17.11.05	157	22,50	SDB0802a	1884		2005		
					SDB0802b	1884		2005		

SDB0803	<i>pinus sylvestris</i>	17.11.05	114	19,00	SDB0803a	1883		2005		
					SDB0803b	1886		2005		
SDB0804	<i>pinus sylvestris</i>	17.11.05	144	21,50	SDB0804a	1884		2005		
					SDB0804b	1889		2005		
SDB0805	<i>pinus sylvestris</i>	17.11.05	131	18,00	SDB0805a	1887		2005		
					SDB0805b	1883		2005		
SDB0806	<i>pinus sylvestris</i>	17.11.05	154	22,00	SDB0806a	1886		2005		
					SDB0806b	1884		2005		
SDB09	Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche									
SDB0901	<i>fraxinus excelsior</i>	17.11.05	93	19,00	SDB0901a			2005		
					SDB0901b			2005		
SDB0902	<i>fraxinus excelsior</i>	17.11.05	162	20,50	SDB0902a			2005		
					SDB0902b			2005		
SDB0903	<i>fraxinus excelsior</i>	17.11.05	109	19,00	SDB0903a			2005		
					SDB0903a			2005		
SDB10	Bleicheröder Berge, Krajaer Kopf, Stufenfläche, Hohlform									
SDB1001	<i>fagus sylvatica</i>	08.12.04	175	21,00	SDB1001a	1853		2004		
					SDB1001b	1855		2004		
SDD01	Dün, Ritterholz, Große Wurzel									
SDD0101	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	108	19,00	SDD0101a	1848		2004		
					SDD0101b	1841		2004		
					SDD0101c	1850		2004		
					SDD0101d	1842		2004		
SDD0102	<i>fagus sylvatica</i>	09.12.04	90	18,00	SDD0102a	1845		2004		
					SDD0102b	1843		2004		
					SDD0102c	1841		2004		
					SDD0102d	1844		2004		
SDD02	Dün, Ritterholz, 2 m Loch									
SDD0201	<i>fagus sylvatica</i>	10.12.04			SDD0201	1896		2004		
					SDD0201	1891		2004		
SDD03	Dün, Ritterholz, Hohlform 10 m Spalte									
SDD0301	<i>fagus sylvatica</i>	10.12.04	154	23,50	SDD0301a	1867		2004		
					SDD0301b	1848		2004		
					SDD0301c	1853		2004		

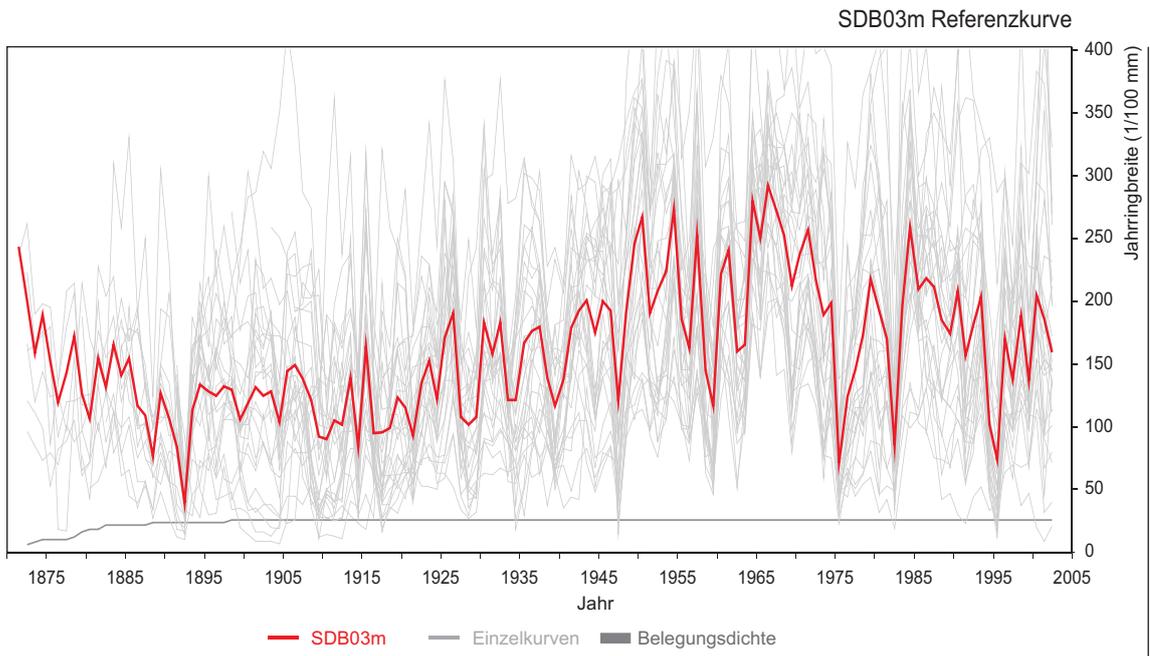
					SDD0301d	1855		2004		
SDM03		Dün, Grenzholz, Spalte mit 2 Buchen								
SDM0301	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	78	18,00	SDM0301a	1843		2002		
					SDM0301b	1841		2002		
					SDM0301c	1839		2002		
					SDM0301d	1844		2002		
SDM0302	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	105	18,50	SDM0302a	1855		2002		
					SDM0302b	1841		2002		
					SDM0302c	1852		2002		
					SDM0302d	1853		2002		
SDM04		Dün, Grenzholz, langgezogene Hohlform								
SDM0401	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	187	25,00	SDM0401a	1758		2002		
					SDM0401b	1811		2002		
					SDM0401c	1799		2002		
					SDM0401d	1797		2002		
SDM05		Dün, Grenzholz, entwurzelt, Parkpl.								
SDM0501	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	163	17,00	SDM0501a	1838		2002		als Scheibe entnommen
								2202		
SDM06		Dün, Grenzholz, entwurzelt, West								
SDM0601	<i>fagus sylvatica</i>	07.05.03	130		SDM0601a	1843		2002		in 11/02 durch Eislast umgestürzt
					SDM0601b	1852		2002		als Scheibe entnommen
SDM07		Dün, Grenzholz, Referenzstandort								
SDM0701	<i>fagus sylvatica</i>	24.03.03	163	21,00	SDM0701a	1842	1842	2002	+	
					SDM0701b	1846	1842	2002	+	
SDM0704	<i>fagus sylvatica</i>	02.05.03	168	23,00	SDM0704a	1870	1875	2002	+	
					SDM0704b	1875	1875	2002	+	
SDM0709	<i>fagus sylvatica</i>	02.05.03	157	24,00	SDM0709a	1859	1859	2002	-	
					SDM0709b	1847	1859	2002	-	
SDM0710	<i>fagus sylvatica</i>	02.05.03	161	26,00	SDM0710a	1855	1855	2002	+	
					SDM0710b	1828	1855	2002	+	
SDM0711	<i>fagus sylvatica</i>	02.05.03	164	27,00	SDM0711a	1885	1885	2002	-	
					SDM0711b	1884	1885	2002	-	
SDM0713	<i>fagus sylvatica</i>	02.05.03	178	28,00	SDM0713a	1860	1860	2002	+	

					SDM0713b	1842	1860	2002	+	
SDM0715	<i>fagus sylvatica</i>	02.05.03	160	27,00	SDM0715a	1856	1872	2002	-	
					SDM0715b	1872	1872	2002	-	
SDM0717	<i>fagus sylvatica</i>	02.05.03	178	24,00	SDM0717a	1878	1878	2002	+	
					SDM0717b	1853	1878	2002	+	
SDM0724	<i>fagus sylvatica</i>	09.01.04	217	30,00	SDM0724a	1879	1879	2003	+	
					SDM0724b	1860	1879	2003	+	
SDM0725	<i>fagus sylvatica</i>	09.01.04	225	31,00	SDM0725a	1882	1895	2003	-	
					SDM0725b	1895	1895	2003	-	
SDM0726	<i>fagus sylvatica</i>	09.01.04	179	27,00	SDM0726a	1847	1855	2003	+	
					SDM0726b	1855	1855	2003	+	
SDM0727	<i>fagus sylvatica</i>	09.01.04	195	26,00	SDM0727a	1821	1837	2003	+	
					SDM0727b	1837	1837	2003	+	
SDM0728	<i>fagus sylvatica</i>	09.01.04	210	29,00	SDM0728a	1823	1823	2003	+	
					SDM0728b	1819	1823	2003	+	
SDM0729	<i>fagus sylvatica</i>	02.02.04	169	17,50	SDM0729a	1822	1822	2003	+	
					SDM0729b	1877	1822	2003	+	
SDM0730	<i>fagus sylvatica</i>	02.02.04	237	24,50	SDM0730a	1892	1892	2003	+	
					SDM0730b	1863	1892	2003	+	
SDM0732	<i>fagus sylvatica</i>	02.02.04	187	22,50	SDM0732a	1825	1874	2003	-	
					SDM0732b	1874	1874	2003	-	
SDM0733	<i>fagus sylvatica</i>	02.02.04	188	23,00	SDM0733a	1835	1841	2003	+	
					SDM0733b	1841	1841	2003	+	
SDM0735	<i>fagus sylvatica</i>	03.02.04	233	26,50	SDM0735a	1875	1875	2003	+	
					SDM0735b	1854	1875	2003	+	
SDM0737	<i>fagus sylvatica</i>	03.02.04	233	28,00	SDM0737a	1829	1835	2003	+	
					SDM0737b	1835	1835	2003	+	
SDM0738	<i>fagus sylvatica</i>	03.02.04	136	24,00	SDM0738a	1943	1943	2003	-	
					SDM0738b	1941	1943	2003	-	
SDM0739	<i>fagus sylvatica</i>	03.02.04	196	22,00	SDM0739a	1859	1862	2003	+	
					SDM0739b	1862	1862	2003	+	
SDM0740	<i>fagus sylvatica</i>	03.02.04	167	24,50	SDM0740a	1839	1848	2003	+	
					SDM0740b	1848	1848	2003	+	
SDE01	Eichsfeld / Westerwald, Junkerholz, abgesperrte Spalte									

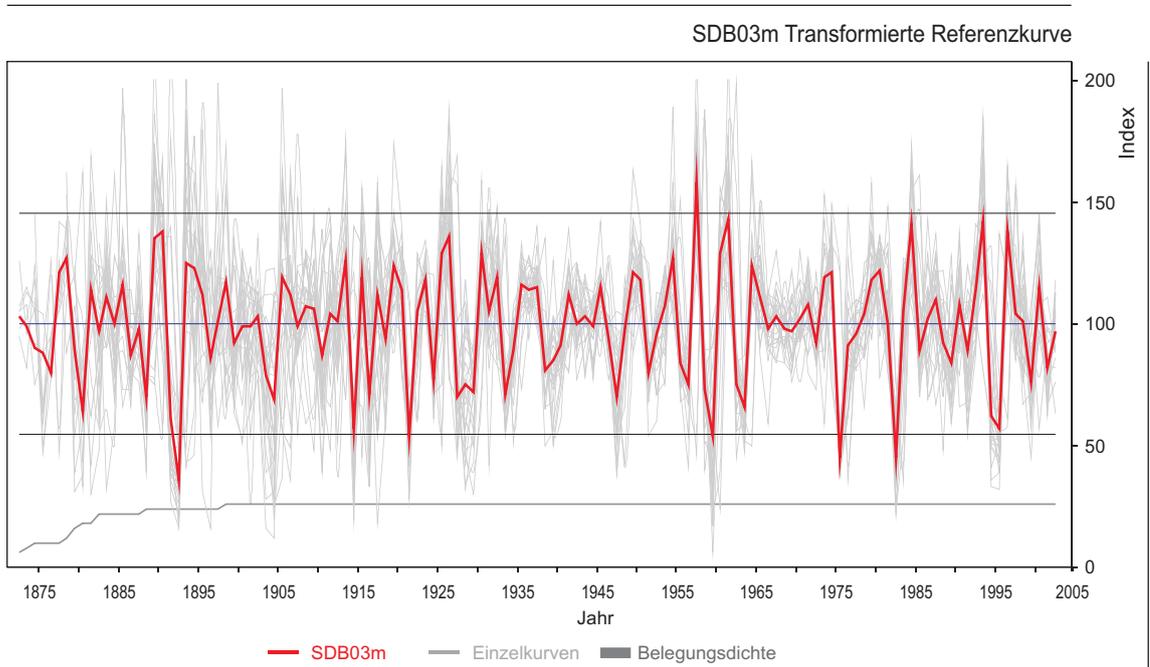
SDE0101	<i>fagus sylvatica</i>	20.01.06	83	17,00	SDE0101a	1878		2005		1877 Keimungsdatum, Mark getroffen
					SDE0101b	1878		2005		
					SDE0101c	1878		2005		
					SDE0101d	1878		2005		
SDE0102	<i>fagus sylvatica</i>	20.01.06	81	16,50	SDE0102a	1880		2005		
					SDE0102b	1880		2005		
					SDE0102c	1883		2005		
					SDE0102d	1883		2005		
SDE08 Eichsfeld, Krombach, Absatzscholle										
SDE0801	<i>fagus sylvatica</i>	23.01.06	64	10,00	SDE0801a	1872		2005		
					SDE0801b	1878		2005		
					SDE0801c	1877		2005		
					SDE0801d	1892		2005		
SDE0802	<i>pinus sylvestris</i>	23.01.06	80	17,00	SDE0802a	1906		2005		
					SDE0802b	1906		2005		
					SDE0802c	1909		2005		
					SDE0802d	1903		2005		
SDE09 Eichsfeld / Westerwald, Junkerholz, abgesperrte Spalte										
SDE0901	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	126	21,00	SDE0901a	1935		2005	-	
					SDE0901b	1933		2005	-	
SDE0902	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	157	24,00	SDE0902a	1935		2005	-	
					SDE0902b	1936		2005	-	
SDE0903	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	129	23,50	SDE0903a	1928		2005	+	
					SDE0903b	1925		2005	+	
SDE0904	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	146	22,00	SDE0904a	1931		2005	-	
					SDE0904b	1930		2005	-	
SDE0905	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	165	26,00	SDE0905a	1927		2005	+	
					SDE0905b	1917		2005	+	
SDE0906	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	139	23,00	SDE0906a	1910		2005	+	
					SDE0906b	1919		2005	+	
SDE0907	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	153	22,50	SDE0907a	1924		2005	+	
					SDE0907b	1910		2005	+	
SDE0908	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	140	24,00	SDE0908a	1936		2005	-	
					SDE0908b	1941		2005	-	

SDE0909	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	155	27,00	SDE0909a	1932		2005	-	
					SDE0909b	1924		2005	-	
SDE0910	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	150	26,50	SDE0910a	1902		2005	+	
					SDE0910b	1901		2005	+	
SDE0911	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	142	23,00	SDE0911a	-		2005	-	
					SDE0911b	-		2005	-	
SDE0912	<i>fagus sylvatica</i>	17.01.06	153	25,00	SDE0912a	1934		2005	-	
					SDE0912b	1936		2005	-	
SDE0913	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	145	24,50	SDE0913a	1934		2005	-	
					SDE0913b	1936		2005	-	
SDE0914	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	167	27,00	SDE0914a	1933		2005	-	
					SDE0914b	1936		2005	-	
SDE0915	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	132	22,00	SDE0915a	1921		2005	+	
					SDE0915b	1931		2005	+	
SDE0916	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	160	26,50	SDE0916a	1928		2005	+	
					SDE0916b	1921		2005	+	
SDE0917	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	155	25,50	SDE0917a	1921		2005	+	
					SDE0917b	1920		2005	+	
SDE0918	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	128	21,50	SDE0918a	1945		2005	-	
					SDE0918b	1934		2005	-	
SDE0919	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	131	21,00	SDE0919a	1951		2005	-	
					SDE0919b	1952		2005	-	
SDE0920	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	156	23,50	SDE0920a	1944		2005	-	
					SDE0920b	1936		2005	-	
SDE0921	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	130	22,00	SDE0921a	1937		2005	-	
					SDE0921b	1933		2005	-	
SDE0922	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	136	20,50	SDE0922a	1936		2005	-	
					SDE0922b	1935		2005	-	
SDE0923	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	145	23,00	SDE0923a	1922		2005	+	
					SDE0923b	1931		2005	+	
SDE0924	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	139	22,00	SDE0924a	1923		2005	+	
					SDE0924b	1923		2005	+	
SDE0925	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	150	25,50	SDE0925a	1932		2005	-	
					SDE0925b	1930		2005	-	

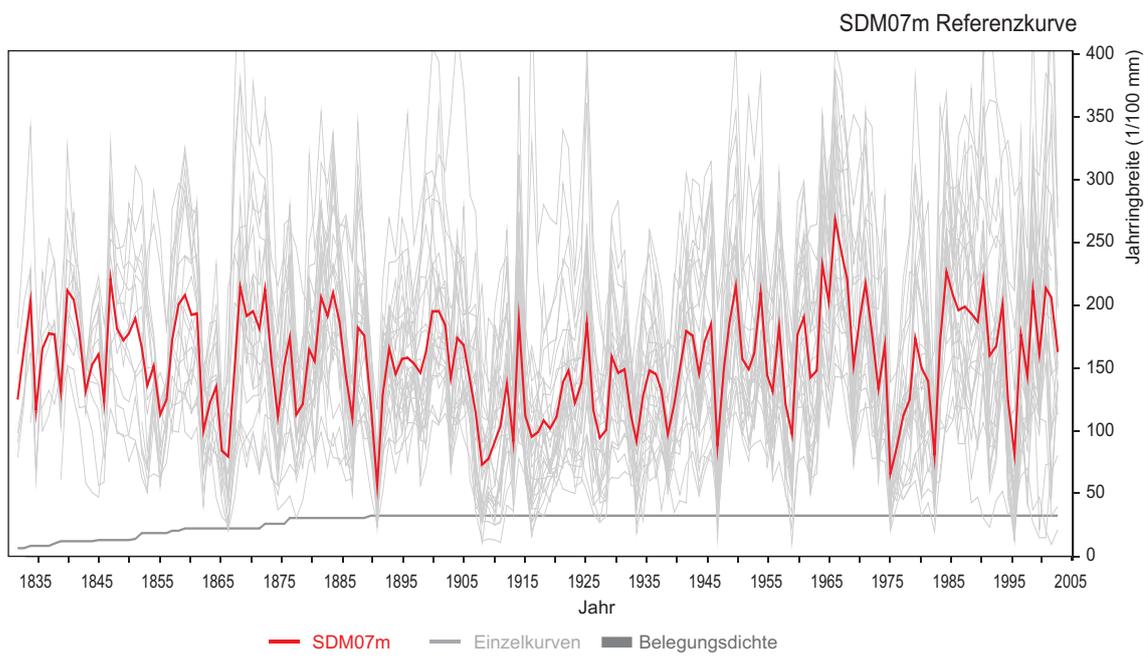
SDE0926	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	150	26,00	SDE0926a	1929		2005	+	
					SDE0926b	1928		2005	+	
SDE0927	<i>fagus sylvatica</i>	18.01.06	171	26,50	SDE0927a	1926		2005	+	
					SDE0927b	1924		2005	+	
SDE0928	<i>fagus sylvatica</i>	19.01.06	138	23,00	SDE0928a	1920		2005	+	
					SDE0928b	1920		2005	+	
SDE0929	<i>fagus sylvatica</i>	19.01.06	155	26,00	SDE0929a	1906		2005	+	
					SDE0929b	1902		2005	+	
SDE0930	<i>fagus sylvatica</i>	19.01.06	178	27,50	SDE0930a	1919		2005	+	
					SDE0930b	1927		2005	+	
SDE10 Eichsfeld/Westerwald, Junkerholz, abgesperrte Spalte										
SDE1001	<i>fagus sylvatica</i>	20.01.06	75	15,00	SDE1001a	1887		2005		
					SDE1001b	1887		2005		
					SDE1001c	1897		2005		
					SDE1001d	1897		2005		
SDT01 Ringau/Treffurt, Appental, kleine Spalte, Hohlformen auf der Stufenfläche										
SDT0101	<i>fagus sylvatica</i>	23.01.06	132	23,50	SDT0101a	1895		2005		sehr junge Zerrspalte
					SDT0101b	1895		2005		
					SDT0101c	1900		2005		
					SDT0101d	1899		2005		
SDT0102	<i>fagus sylvatica</i>	23.01.06	103	19,50	SDT0102a	1923		2005		Baum an großer Hohlform auf der Stufenfläche
					SDT0102b	1923		2005		
					SDT0102c	1914		2005		
					SDT0102d	1914		2005		



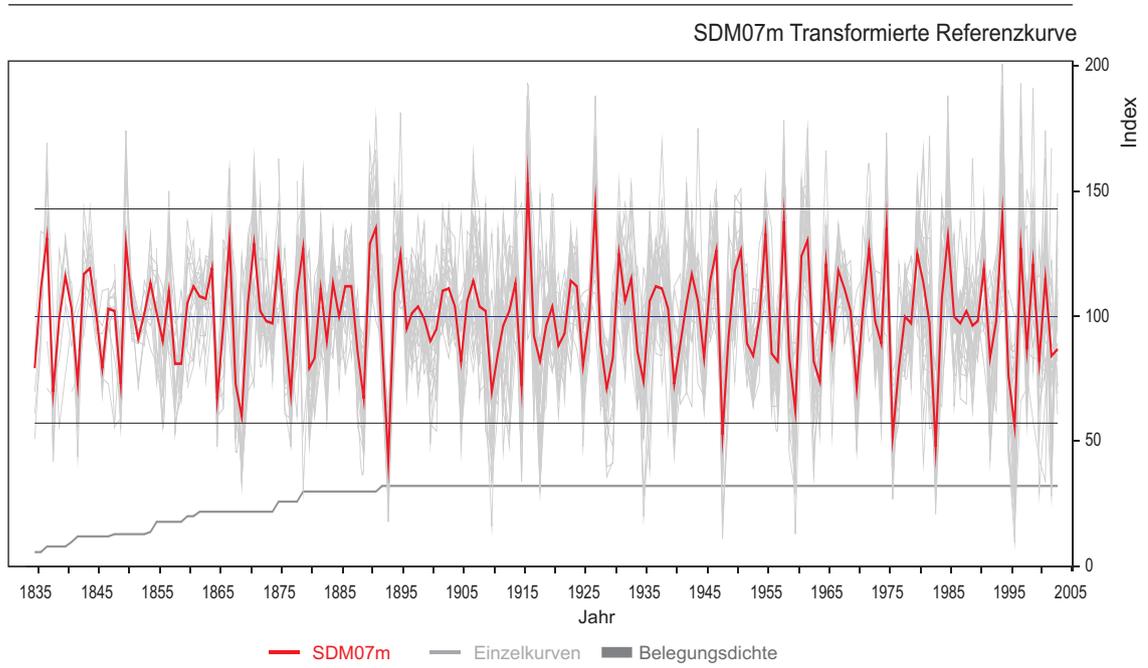
Anlage 2.1: Referenzkurve SDB03m (Rohwerte), Bleicheröder Berge mit Belegungsdichte (graue Linie).



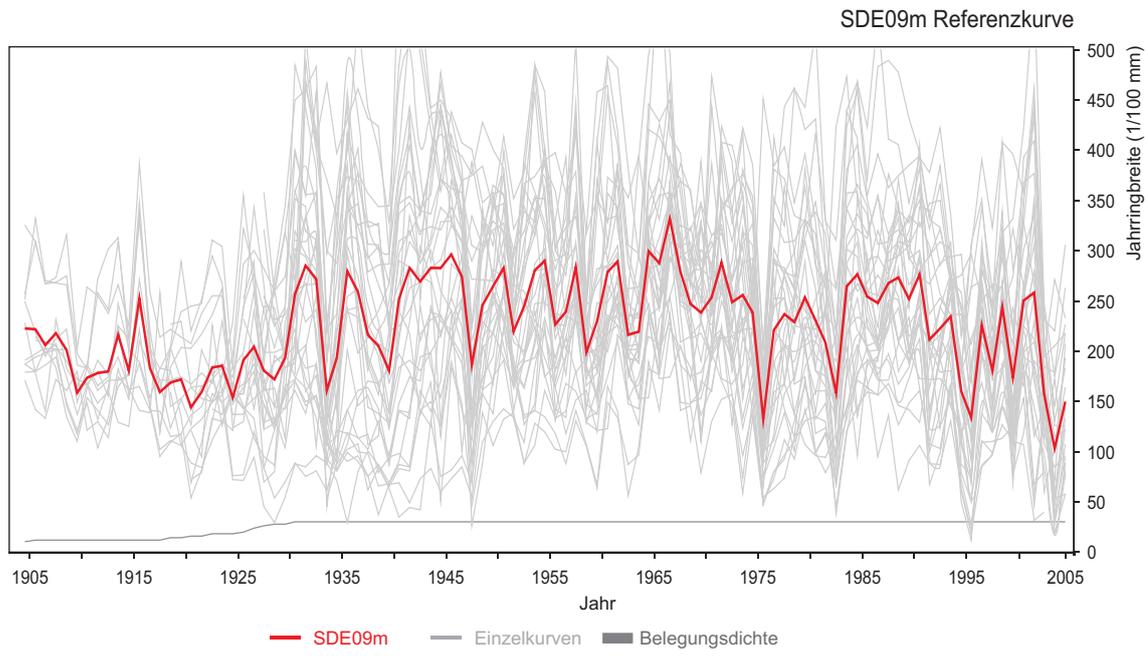
Anlage 2.2: Transformierte Referenzkurve, SDB03 (Bleicheröder Berge), mit Belegungsdichte (graue Linie). Alle Werte außerhalb der doppelten Standardabweichung gelten als Weiserjahre (HUGHES 1989).



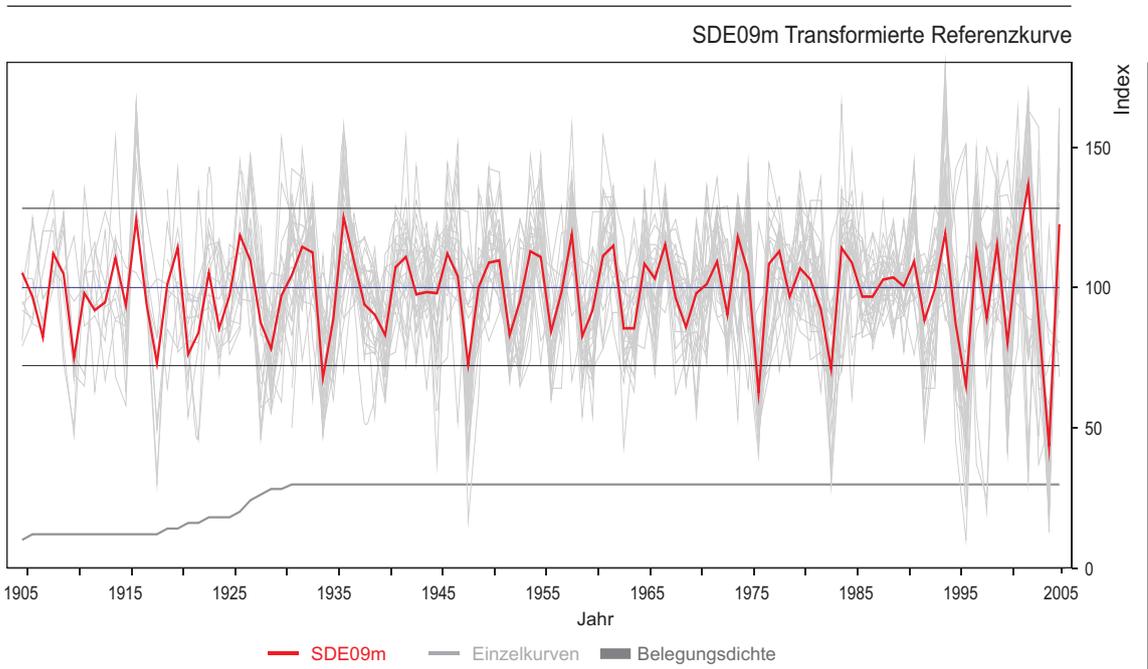
Anlage 2.3: Referenzkurve SDM07m (Rohwerte), Dün mit Belegungsdichte (graue Linie).



Anlage 2.4: Transformierte Referenzkurve, SDM07m (Dün), mit Belegungsdichte (graue Linie). Alle Werte außerhalb der doppelten Standardabweichung gelten als Weiserjahre (HUGHES 1989).



Anlage 2.5: Referenzkurve SDE09m (Rohwerte), Junkerholz/Eichsfeld mit Belegungsdichte (graue Linie).



Anlage 2.6: Transformierte Referenzkurve, SDE09m (Junkerholz/Eichsfeld), mit Belegungsdichte (graue Linie). Alle Werte außerhalb der doppelten Standardabweichung gelten als Weiserjahre (HUGHES 1989).

Institut für Geowissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle – Wittenberg  
Dendrogeomorphologie; Geländeaufnahmebogen, Wurzel (künstlich freigelegt)

<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>Bestandsdichte</b>	
<b>Lokalität</b>		<b>Bodenvegetation</b>	

**Wurzeldaten (künstlich freigelegt)**

Baumcode (ID)	Baumart	Wurzel-code	freigelegt (in cm)	Wurzel vergraben (in cm)	Umfang (in cm)	Tiefe (in cm)	Entfernung vom (in cm) Stammfuß
					Bemerkungen:		
Foto Nr.	-	-	-	-			

Skizze

**Institut für Geowissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle – Wittenberg**  
**Dendrogeomorphologie; Geländeaufnahmebogen Wurzel (nach H.Gärtner)**

<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>Bestandsdichte</b>	
<b>Lokalität</b>		<b>Bodenvegetation</b>	

**Wurzeldaten (natürlich freigelegt)**

Wurzelcode (ID)	Baumcode (ID)	Baumart	Wurzellänge	Umfang	Verletzungen	Verwachsung
freigelegt (in cm)	vergraben (in cm)	Wurzelende	Entfernung vom Stammfuß	Bemerkungen:		
Foto Nr.	-	-	-			

Skizze

**Institut für Geowissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle – Wittenberg**  
**Dendrogeomorphologie; Geländeaufnahmebogen Baum** (nach H.Gärtner)

<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>Bestandsdichte</b>	
<b>Lokalität</b>		<b>Bodenvegetation</b>	

**Baumdaten**

Bohrkern (ID)	Baumart	Baumhöhe	Referenz?	Störung?	Art der Störung	Bohrhöhe
<b>Baumumfang</b>	<b>Bohr- richtung</b>	<b>Kernverlust</b>	<b>Fäule</b>	<b>Bemerkungen:</b>		

Bohrkern (ID)	Baumart	Baumhöhe	Referenz?	Störung?	Art der Störung	Bohrhöhe
<b>Baumumfang</b>	<b>Bohr- richtung</b>	<b>Kernverlust</b>	<b>Fäule</b>	<b>Bemerkungen:</b>		

Bohrkern (ID)	Baumart	Baumhöhe	Referenz?	Störung?	Art der Störung	Bohrhöhe
<b>Baumumfang</b>	<b>Bohr- richtung</b>	<b>Kernverlust</b>	<b>Fäule</b>	<b>Bemerkungen:</b>		

Anlage 4.1 SPSS - Datenauswertung

Zeitraum		Univariate Statistiken						Kolmogorov-Smirnov		T-Test			Mann-Whitney-Test			Resultat	
Proben		N	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Minimum	Maximum	df	Signifikanz	T	df	Signifikanz (2-seitig)	Mittlerer Rang	Rangsumme	Signifikanz (2-seitig)	Sig.	H <sub>0</sub>
2DB0501e	1883-1953	71	3943,98	3863,76	759,59	1565,78	6088,25	71	0,046	12,525	118	0,000	83,32	5916,00	0,000	***	-
	1954-2002	49	2462,88	2517,63	393,90	1151,20	3365,41	49	0,200				27,43	1344,00			
1DD0503e	1861-1926	66	3614,35	3482,04	840,39	1717,10	5639,23	66	0,200	20,585	142	0,000	111,15	7336,00	0,000	***	-
	1927-2004	78	1487,21	1404,03	328,32	942,22	2355,35	78	0,007				39,79	3104,00			
0DD0503e	1854-1925	72	3504,99	3521,78	864,44	1241,21	5847,89	72	0,200	3,115	74	0,003	40,31	2902,00	0,002	**	-
	1926-1929	4	2149,13	2210,61	141,66	1937,51	2237,78	4	.				6,00	24,00			
0DD0503e	1854-1925	72	3504,99	3521,78	864,44	1241,21	5847,89	72	0,200	4,904	98	0,000	58,90	4241,00	0,000	***	-
	1930-1957	28	2597,61	2458,45	735,08	1308,89	4414,22	28	0,177				28,89	809,00			
0DD0503e	1854-1925	72	3504,99	3521,78	864,44	1241,21	5847,89	72	0,200	14,676	117	0,000	82,71	5955,00	0,000	***	-
	1958-2004	47	1593,09	1619,48	272,38	1033,16	2158,98	47	0,200				25,21	1185,00			
0DD0503e	1926-1929	4	2149,13	2210,61	141,66	1937,51	2237,78	4	.	1,201	30	0,239	10,00	40,00	0,138	ns	+
	1930-1957	28	2597,61	2458,45	735,08	1308,89	4414,22	28	0,177				17,43	488,00			
0DD0503e	1930-1957	28	2597,61	2458,45	735,08	1308,89	4414,22	28	0,177	8,473	73	0,000	58,43	1636,00	0,000	***	-
	1958-2004	47	1593,09	1619,48	272,38	1033,16	2158,98	47	0,200				25,83	1214,00			
2DD0101e	1853-1918	66	4178,82	4348,33	922,54	1656,52	5785,35	66	0,200	2,820	78	0,006	44,14	2913,00	0,002	**	-
	1919-1932	14	3462,94	3619,35	459,94	2590,93	4320,29	14	0,200				23,36	327,00			

2DD0101e	1919-1932	14	3462,94	3619,35	459,94	2590,93	4320,29	14	0,200	2,625	28	0,014	19,57	274,00	0,018	*	-
	1933-1948	16	3125,74	3145,46	216,10	2779,79	3417,36	16	0,200				11,94	191,00			
2DD0101e	1933-1948	16	3125,74	3145,46	216,10	2779,79	3417,36	16	0,200	5,278	48	0,000	37,94	607,00	0,000	***	-
	1949-1982	34	2739,57	2741,16	251,99	2299,24	3113,10	34	0,200				19,65	668,00			
2DD0101e	1949-1982	34	2739,57	2741,16	251,99	2299,24	3113,10	34	0,200	7,116	54	0,000	37,91	1289,00	0,000	***	-
	1983-2004	22	2316,74	2283,47	146,53	2102,12	2626,83	22	0,200				13,95	307,00			
5DD0101e	1867-1919	53	4361,73	4192,48	1025,85	2037,43	6329,99	53	0,200	6,101	64	0,000	39,40	2088,00	0,000	***	-
	1920-1932	13	2576,88	2691,73	453,45	1478,80	2992,96	13	0,068				9,46	123,00			
5DD0101e	1920-1932	13	2576,88	2691,73	453,45	1478,80	2992,96	13	0,068	6,937	62	0,000	10,23	133,00	0,000	***	-
	1933-1983	51	3533,97	3608,98	441,81	2549,80	4507,18	51	0,200				38,18	1947,00			
5DD0101e	1933-1983	51	3533,97	3608,98	441,81	2549,80	4507,18	51	0,200	8,192	70	0,000	45,82	2337,00	0,000	***	-
	1984-2004	21	2691,52	2651,29	250,18	2346,35	3054,65	21	0,160				13,86	291,00			
5DD0101e	1920-1932	13	2576,88	2691,73	453,45	1478,80	2992,96	13	0,068	0,953	32	0,348	16,62	216,00	0,684	ns	+
	1984-2004	21	2691,52	2651,29	250,18	2346,35	3054,65	21	0,160				18,05	379,00			
1DD0101e	1850-1949	100	4211,81	4268,53	881,39	1914,38	6358,54	100	0,200	12,201	153	0,000	101,79	10179,0	0,000	***	-
	1950-2004	55	2714,20	2728,78	300,64	2160,05	3340,95	55	0,200				34,75	1911,00			
0DE0102e	1867-1903	37	3024,79	3053,52	629,39	1941,44	4177,80	37	0,200	4,638	41	0,000	24,73	915,00	0,000	***	-
	1904-1909	6	1790,50	1819,56	382,97	1166,91	2301,78	6	0,200				5,17	31,00			
0DE0102e	1904-1909	6	1790,50	1819,56	382,97	1166,91	2301,78	6	0,200	2,915	15	0,011	5,17	31,00	0,021	*	-
	1910-1920	11	2260,93	2273,44	279,88	1789,78	2672,17	11	0,200				11,09	122,00			
0DE0102e	1910-1920	11	2260,93	2273,44	279,88	1789,78	2672,17	11	0,200	6,053	29	0,000	24,82	273,00	0,000	***	-
	1921-1940	20	1658,31	1678,63	257,19	1204,87	2044,05	20	0,200				11,15	223,00			

ODE0102e	1921-1940	20	1658,31	1678,63	257,19	1204,87	2044,05	20	0,200	5,763	83	0,000	65,55	1311,00	0,000	***	-
	1941-2005	65	1286,05	1302,70	251,21	672,38	1794,04	65	0,200				36,06	2344,00			
ODE0102e	1867-1903	37	3024,79	3053,52	629,39	1941,44	4177,80	37	0,200	3,889	46	0,000	28,27	1046,00	0,001	***	-
	1910-1920	11	2260,93	2273,44	279,88	1789,78	2672,17	11	0,200				11,82	130,00			
ODE0102e	1904-1909	6	1790,50	1819,56	382,97	1166,91	2301,78	6	0,200	0,986	24	0,334	15,83	95,00	0,394	ns	+
	1921-1940	20	1658,31	1678,63	257,19	1204,87	2044,05	20	0,200				12,80	256,00			
ODT0101e	1926-1992	67	4154,98	4304,78	1186,64	1013,13	7187,91	67	0,200	7,443	78	0,000	46,73	3131,00	0,000	***	-
	1993-2005	13	1657,96	1641,56	470,14	978,80	2296,81	13	0,200				8,38	109,00			
1DT0101e	1929-1992	64	3969,30	3894,69	1210,19	1253,98	6834,94	64	0,200	6,996	75	0,000	45,22	2894,00	0,000	***	-
	1993-2005	13	1589,92	1577,79	348,96	1005,15	2097,58	13	0,200				8,38	109,00			
2DT0101e	1931-1992	62	3967,22	4095,24	1171,57	1380,22	7035,77	62	0,200	6,901	73	0,000	44,18	2739,00	0,000	***	-
	1993-2005	13	1682,61	1739,85	433,59	657,36	2215,91	13	0,200				8,54	111,00			
1DD0104f	1900-1977	78	4442,63	4503,27	1044,37	1354,42	7863,58	78	0,083	8,403	103	0,000	65,12	5079,00	0,000	***	-
	1978-2004	27	2713,35	2788,38	367,33	1682,69	3188,21	27	0,031				18,00	486,00			
1DB0101f	1889-1913	25	3168,53	3052,19	856,65	1183,53	4702,22	25	0,200	3,608	50	0,001	33,80	845,00	0,001	***	-
	1914-1940	27	2458,22	2388,89	538,45	1672,76	3716,72	27	0,200				19,74	533,00			
1DB0101f	1914-1940	27	2458,22	2388,89	538,45	1672,76	3716,72	27	0,200	6,003	46	0,000	33,26	898,00	0,000	***	-
	1941-1961	21	1657,24	1692,20	326,83	892,75	2155,58	21	0,200				13,24	278,00			
1DB0101f	1941-1961	21	1657,24	1692,20	326,83	892,75	2155,58	21	0,200	-9,223	30	0,000	11,00	231,00	0,000	***	-
	1962-1972	11	2697,11	2664,82	248,29	2336,81	3161,57	11	0,200				27,00	297,00			

1DB0101f	1962-1972	11	2697,11	2664,82	248,29	2336,81	3161,57	11	0,200	6,713	34	0,000	30,09	331,00	0,000	***	-
	1973-1996	25	2142,73	2130,28	219,37	1797,59	2576,71	25	0,200				13,40	335,00			
1DB0101f	1973-1996	25	2142,73	2130,28	219,37	1797,59	2576,71	25	0,200	3,128	30	0,004	18,76	469,00	0,010	**	-
	1996-2004	7	1811,50	1936,70	337,90	1058,50	2019,56	7	0,002				8,43	59,00			
1DB0101f	1889-1913	25	3168,53	3052,19	856,65	1183,53	4702,22	25	0,200	1,779	34	0,084	20,84	521,00	0,045	*	-
	1962-1972	11	2697,11	2664,82	248,29	2336,81	3161,57	11	0,200				13,18	145,00			
1DB0101f	1914-1940	27	2458,22	2388,89	538,45	1672,76	3716,72	27	0,200	2,726	50	0,009	30,96	836,00	0,027	*	-
	1973-1996	25	2142,73	2130,28	219,37	1797,59	2576,71	25	0,200				21,68	542,00			
1DB0101f	1941-1961	21	1657,24	1692,20	326,83	892,75	2155,58	21	0,200	1,073	26	0,293	13,14	276,00	0,131	ns	+
	1996-2004	7	1811,50	1936,70	337,90	1058,50	2019,56	7	0,002				18,57	130,00			

N - Stichprobenumfang; df - Freiheitsgrad; T - Testwert des t-Testes; Sig. - Signifikanz

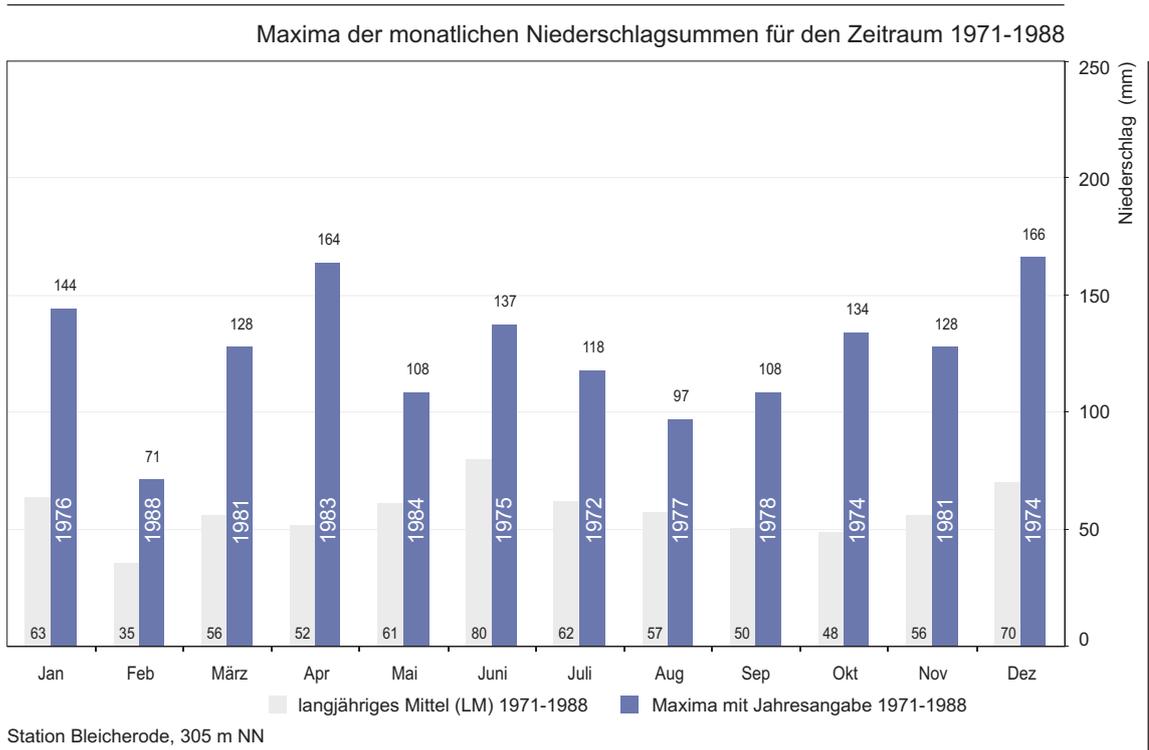
Anlage 4.2 SPSS - Datenauswertung

Zeitraum		Univariate Statistiken					Kolmogorov-Smirnov		T-Test			Wilcoxon-Test				Resultat			
Proben		N	Mittelwert	Median	Standard-abweichung	Minimum	Maximum	df	Signifikanz	T	df	Signifikanz (2-seitig)	N	Mittlerer Rang	Rang-summe	Signifikanz (2-seitig)	Annahme		
																	Sig.	H <sub>0</sub>	
2DB0501e	1914-1953	40	3896,12	3849,69	672,37	1778,98	5197,26	40	0,200	10,674	39	0,000	Negative Ränge	1 <sup>a</sup>	17,00	17,00	0,000	***	-
0DB0501e	1914-1953	40	2633,09	2677,08	333,03	1820,89	3287,80	40	0,096				Positive Ränge	39 <sup>b</sup>	20,59	803,00			
													Bindungen	0 <sup>c</sup>					
													Gesamt	40					
													a. 2DB0501e < 0DB0501e						
													b. 2DB0501e > 0DB0501e						
													c. 2DB0501e = 0DB0501e						
0DD0503e	1929-1958	30	2538,91	2381,61	754,85	1223,24	4414,22	30	0,200	9,053	29	0,000	Negative Ränge	30 <sup>a</sup>	15,50	465,00	0,000	***	-
1DD0503e	1929-1958	30	1278,73	1224,04	188,45	1012,86	1957,45	30	0,153				Positive Ränge	0 <sup>b</sup>	0,00	0,00			
													Bindungen	0 <sup>c</sup>					
													Gesamt	30					
													a. 1DD0503e < 0DD0503e						
													b. 1DD0503e > 0DD0503e						
													c. 1DD0503e = 0DD0503e						
1DD0503e	1929-1958	30	1278,73	1224,04	188,45	1012,86	1957,45	30	0,153	13,063	29	0,000	Negative Ränge	0 <sup>d</sup>	0,00	0,00	0,000	***	-
3DD0503e	1929-1958	30	2218,06	2268,80	373,22	1164,90	2992,72	30	0,200				Positive Ränge	30 <sup>e</sup>	15,50	465,00			
													Bindungen	0 <sup>f</sup>					
													Gesamt	30					
													d. 3DD0503e < 1DD0503e						
													e. 3DD0503e > 1DD0503e						
													f. 3DD0503e = 1DD0503e						

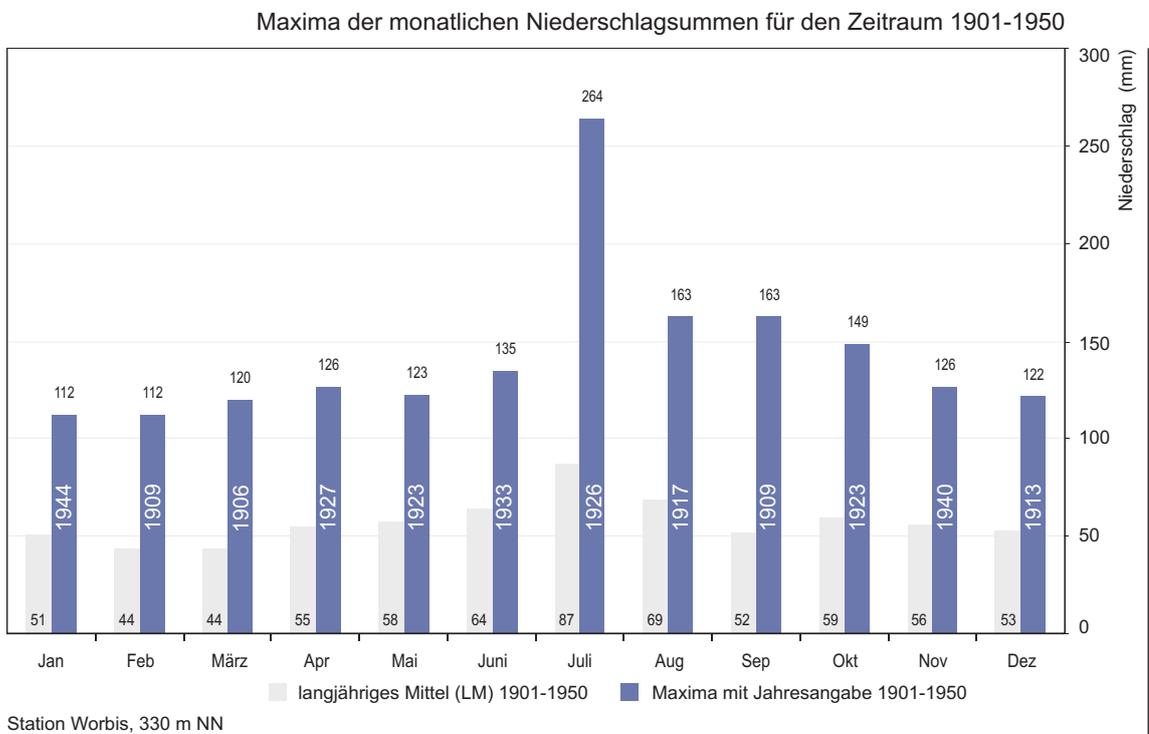
0DD0503e	1929-1958	30	2538,91	2381,61	754,85	1223,24	4414,22	30	0,200	2,484	29	0,019	Negative Ränge	22 <sup>g</sup>	15,55	342,00	0,024	*	-
3DD0503e	1929-1958	30	2218,06	2268,80	373,22	1164,90	2992,72	30	0,200				Positive Ränge	8 <sup>h</sup>	15,38	123,00			
													Bindungen	0 <sup>i</sup>					
													Gesamt	30					
													g. 3DD0503e < 0DD0503e						
													h. 3DD0503e > 0DD0503e						
													i. 3DD0503e = 0DD0503e						
0DD0503e	1973-1982	10	1844,94	1873,77	235,47	1403,83	2158,98	10	0,200	2,298	9	0,047	Negative Ränge	8 <sup>a</sup>	5,75	46,00	0,059	ns	+
1DD0503e	1973-1982	10	1687,38	1751,17	196,11	1235,57	1908,03	10	0,200				Positive Ränge	2 <sup>b</sup>	4,50	9,00			
													Bindungen	0 <sup>c</sup>					
													Gesamt	10					
													a. 1DD0503e < 0DD0503e						
													b. 1DD0503e > 0DD0503e						
													c. 1DD0503e = 0DD0503e						
1DD0503e	1973-1982	10	1687,38	1751,17	196,11	1235,57	1908,03	10	0,200	9,987	9	0,000	Negative Ränge	0 <sup>d</sup>	0,00	0,00	0,005	**	-
3DD0503e	1973-1982	10	2352,56	2339,03	299,87	1791,52	2953,35	10	0,200				Positive Ränge	10 <sup>e</sup>	5,50	55,00			
													Bindungen	0 <sup>f</sup>					
													Gesamt	10					
													d. 3DD0503e < 1DD0503e						
													e. 3DD0503e > 1DD0503e						
													f. 3DD0503e = 1DD0503e						
0DD0503e	1973-1982	10	1844,94	1873,77	235,47	1403,83	2158,98	10	0,200	6,282	9	0,000	Negative Ränge	0 <sup>g</sup>	0,00	0,00	0,005	**	-
3DD0503e	1973-1982	10	2352,56	2339,03	299,87	1791,52	2953,35	10	0,200				Positive Ränge	10 <sup>h</sup>	5,50	55,00			
													Bindungen	0 <sup>i</sup>					
													Gesamt	10					
													g. 3DD0503e < 0DD0503e						
													h. 3DD0503e > 0DD0503e						
													i. 3DD0503e = 0DD0503e						

1DD0101e	1950-2004	55	2714,20	2728,78	300,64	2160,05	3340,95	55	0,200	3,076	54	0,003	Negative Ränge	35 <sup>a</sup>	32,00	1120,00	0,003	**	-
2DD0101e	1950-2005	55	2572,14	2517,42	302,13	2102,12	3113,10	55	0,200				Positive Ränge	20 <sup>b</sup>	21,00	420,00			
													Bindungen	0 <sup>c</sup>					
													Gesamt	55					
													a. 2DD0101e < 1DD0101e						
													b. 2DD0101e > 1DD0101e						
													c. 2DD0101e = 1DD0101e						
1DD0101e	1950-2004	55	2714,20	2728,78	300,64	2160,05	3340,95	55	0,200	12,051	54	0,000	Negative Ränge	12 <sup>d</sup>	28,67	344,00	0,000	***	-
4DD0101f	1950-2005	55	4422,76	4545,15	1059,91	1504,31	6518,59	55	0,154				Positive Ränge	43 <sup>e</sup>	27,81	1196,00			
													Bindungen	0 <sup>f</sup>					
													Gesamt	55					
													d. 4DD0101f < 1DD0101f						
													e. 4DD0101f > 1DD0101f						
													f. 4DD0101f = 1DD0101f						
2DD0101e	1950-2004	55	2572,14	2517,42	302,13	2102,12	3113,10	55	0,200	13,970	54	0,000	Negative Ränge	1 <sup>g</sup>	12,00	12,00	0,000	***	-
4DD0101f	1950-2005	55	4422,76	4545,15	1059,91	1504,31	6518,59	55	0,154				Positive Ränge	54 <sup>h</sup>	28,30	1528,00			
													Bindungen	0 <sup>i</sup>					
													Gesamt	55					
													g. 4DD0101f < 2DD0101e						
													h. 4DD0101f > 2DD0101e						
													i. 4DD0101f = 2DD0101e						

N - Stichprobenumfang; df - Freiheitsgrad; T - Testwert des t-Testes; Sig. - Signifikanz

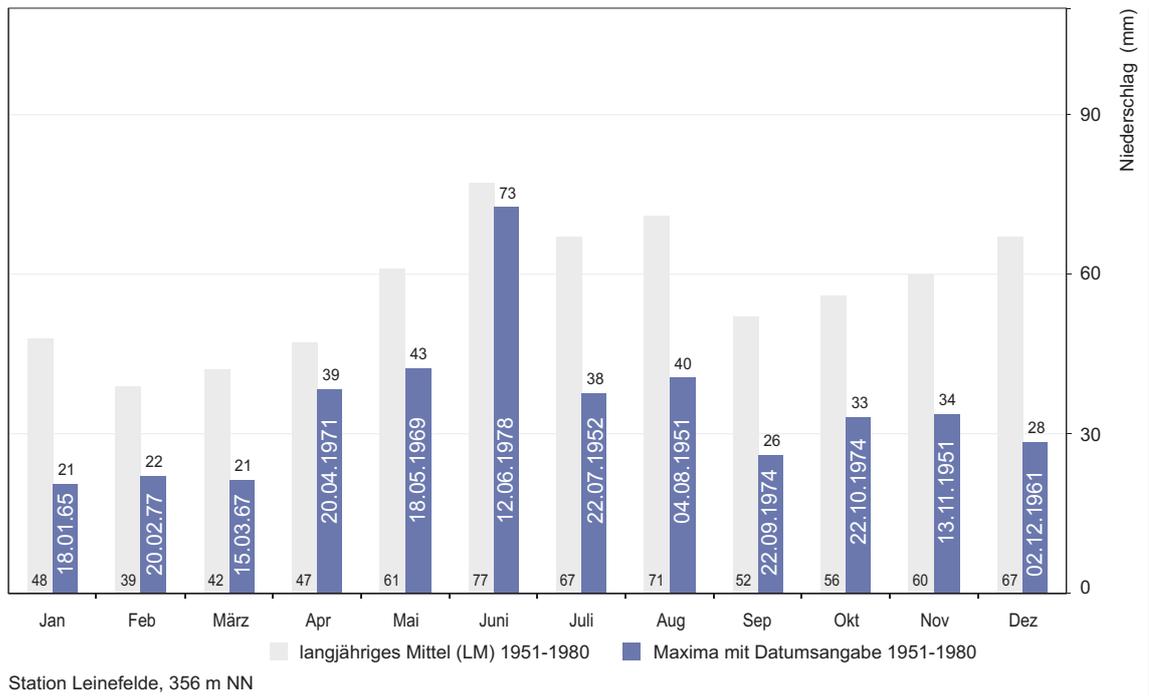


Anlage 5.1: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1971-1988, Station Bleicherode, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1971-1988).



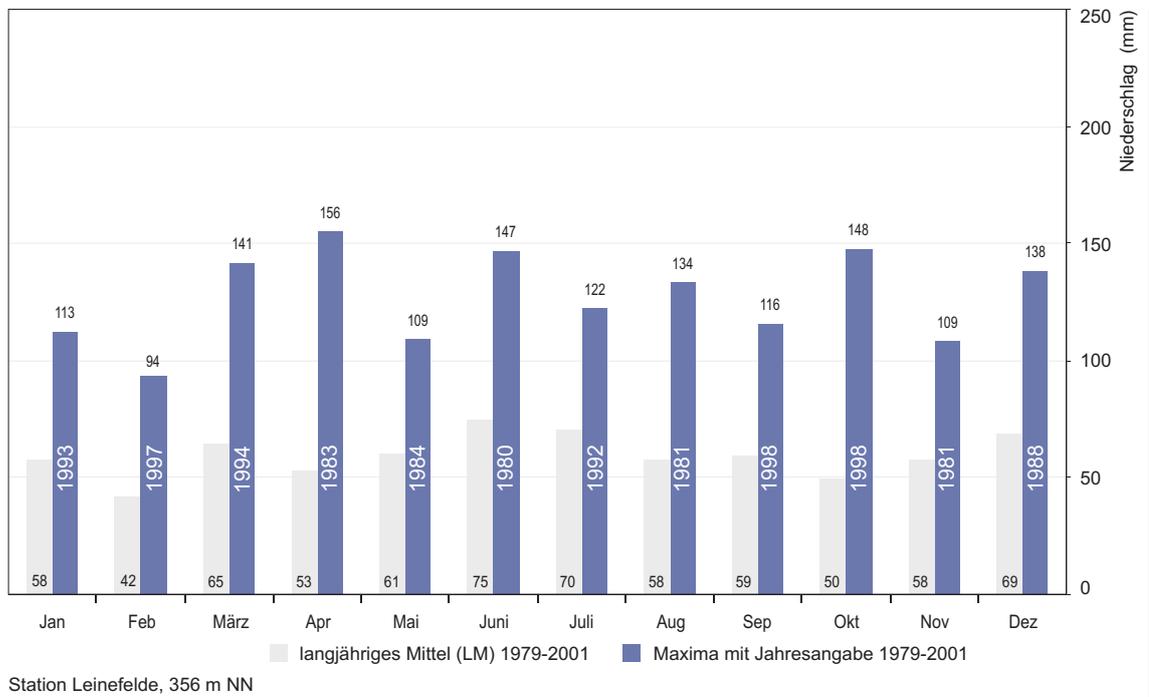
Anlage 5.2: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1901-1950, Station Worbis, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1978).

## Höchste Tagessumme der Niederschlagshöhe für den Zeitraum 1951-1980

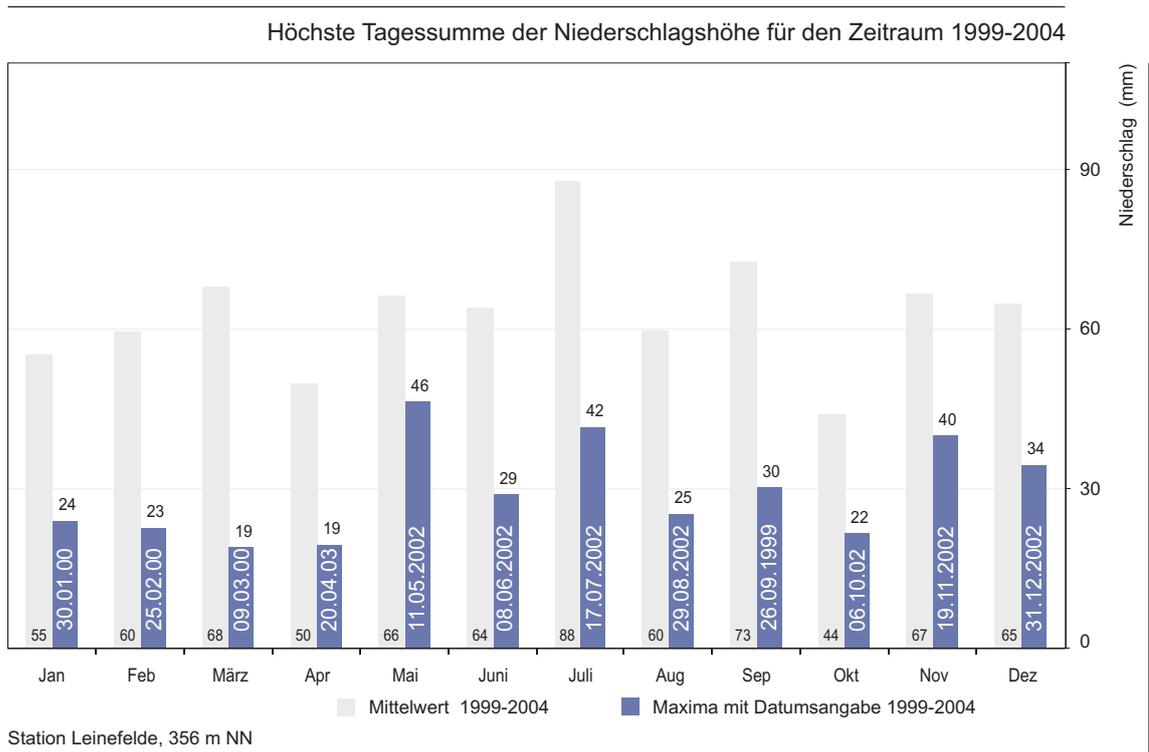


Anlage 5.3: Höchste Tagessumme der Niederschlagshöhe (mit Datumsangabe, blaue Balken) in den Jahren 1951-1980, Station Leinefelde, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1987).

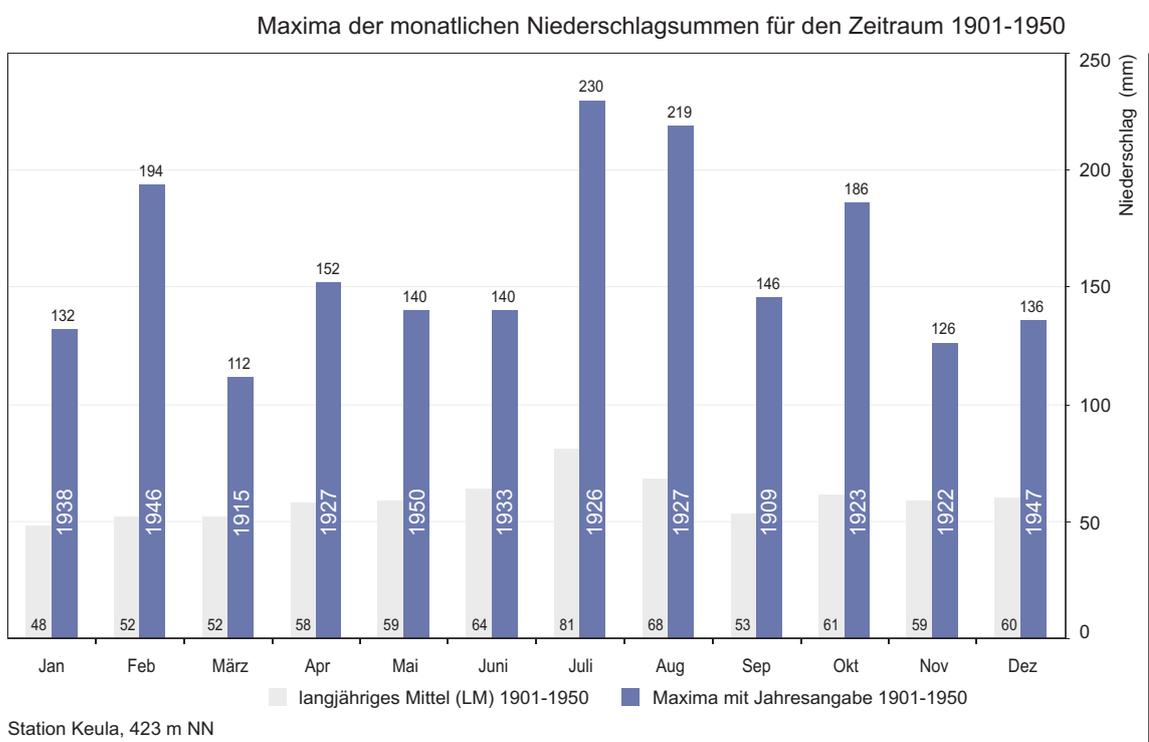
## Maxima der monatlichen Niederschlagssummen für den Zeitraum 1979-2001



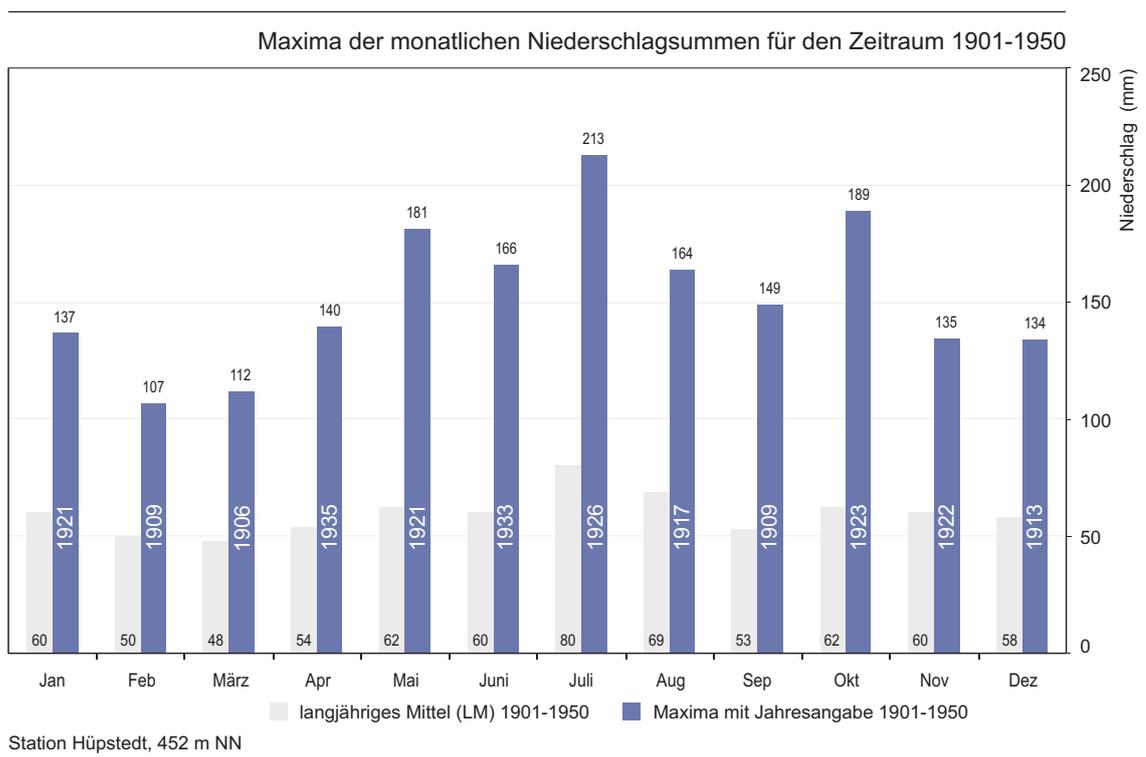
Anlage 5.4: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1979-2001, Station Leinefelde, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst, DWD schriftliche Mitteilungen).



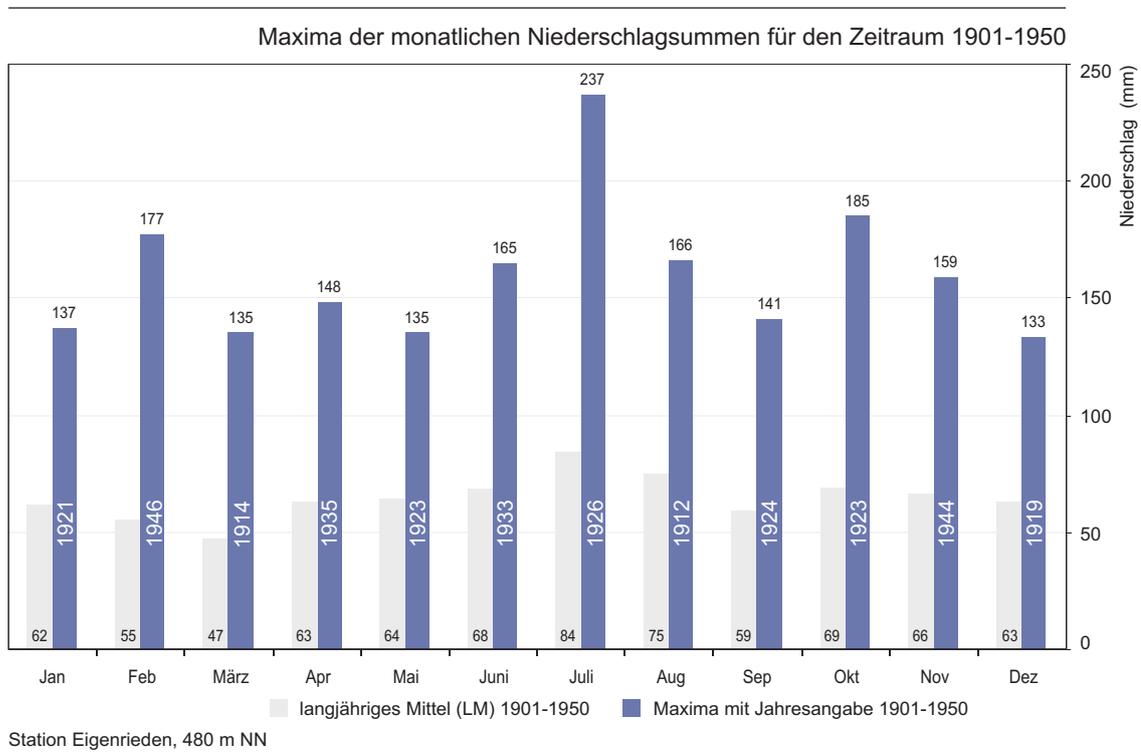
Anlage 5.5: Höchste Tagessumme der Niederschlagshöhe (mit Datumsangabe, blaue Balken) in den Jahren 1999-2004, Station Leinefelde, im Vergleich zum Mittelwert der jeweiligen Monate (graue Balken) in diesem Zeitraum (DWD 1999-2004).



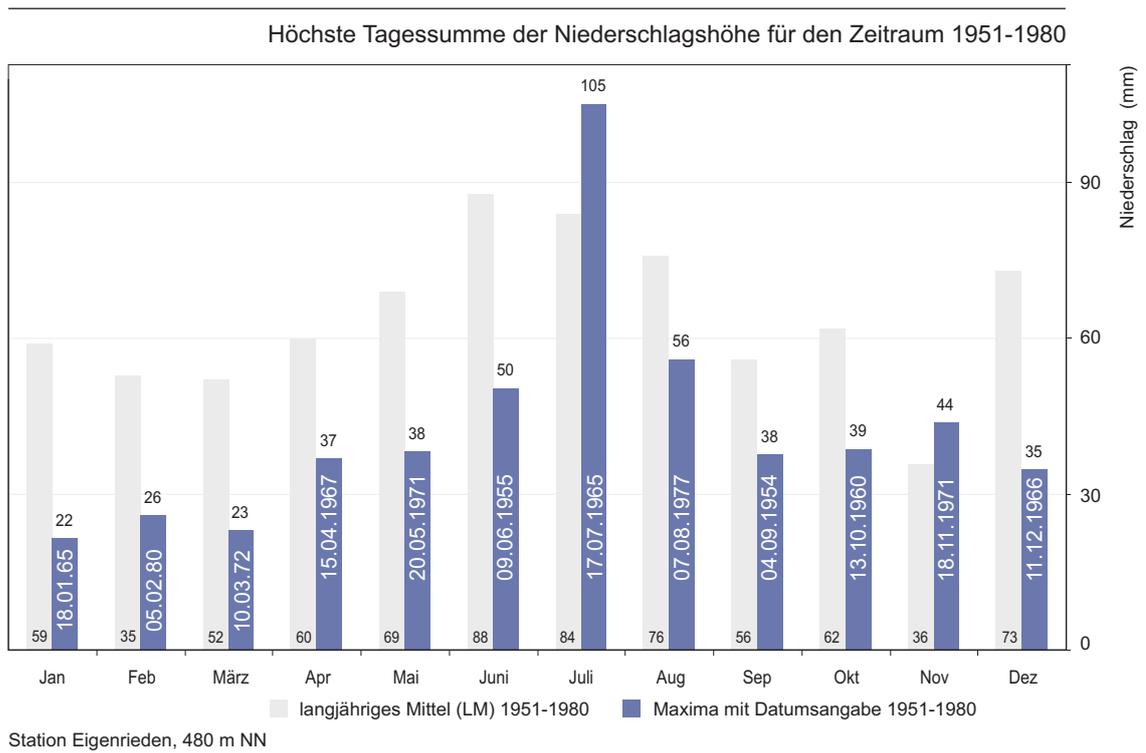
Anlage 5.6: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1901-1950, Station Keula, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1978).



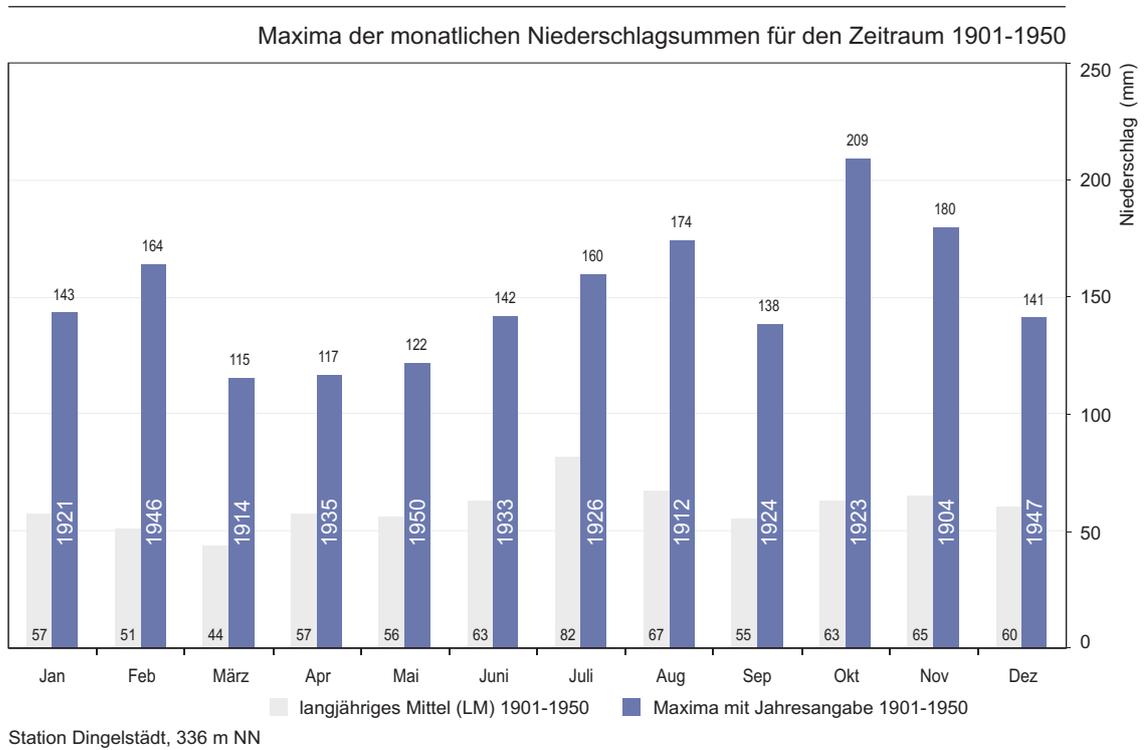
Anlage. 5.7: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1901-1950, Station Hüpstedt, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1978).



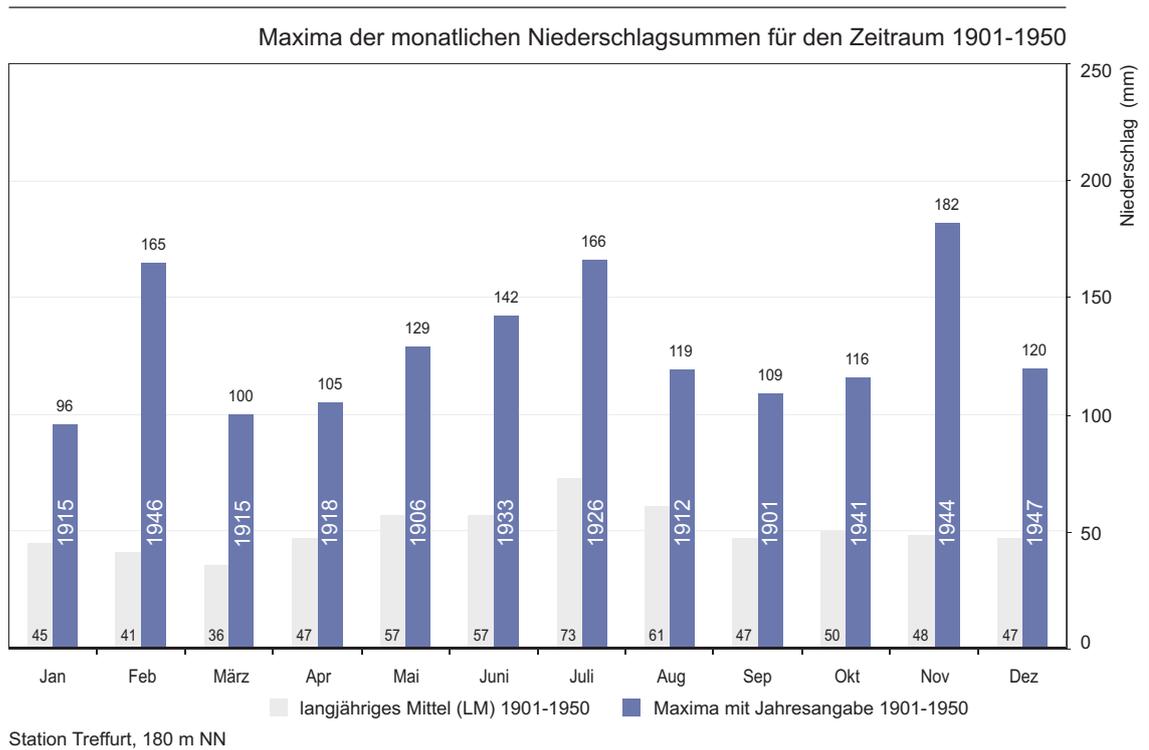
Anlage. 5.8: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1901-1950, Station Eigenrieden, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1978).



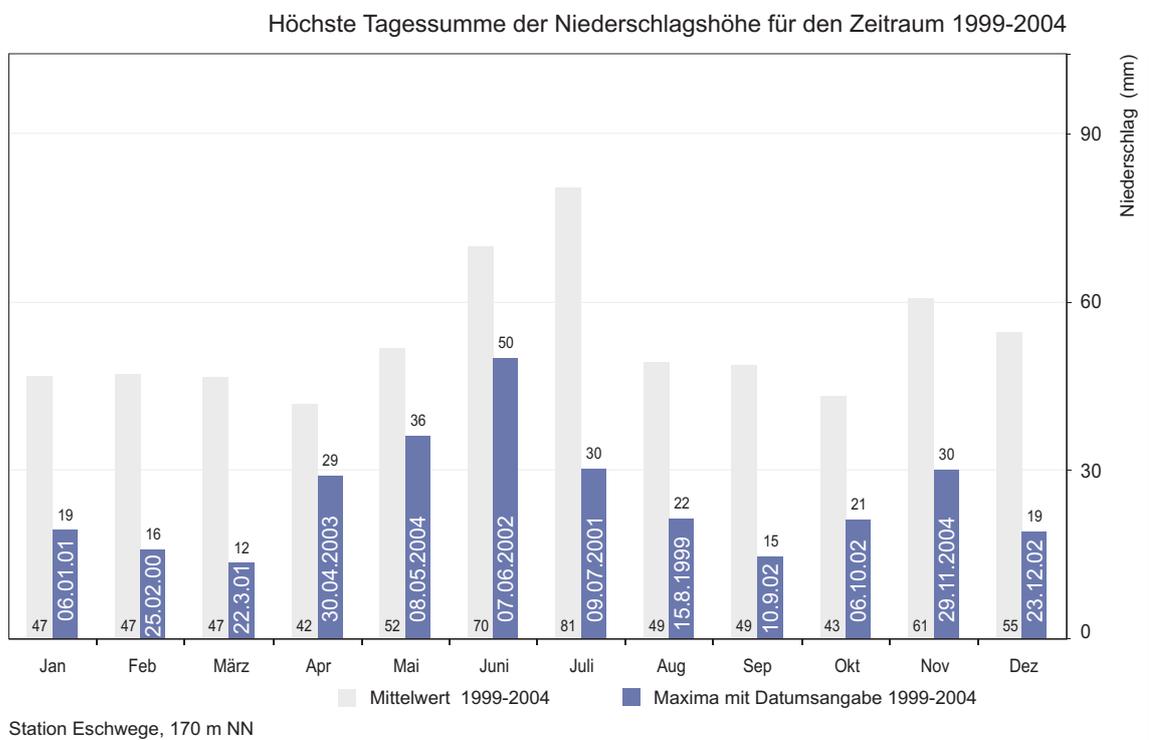
Anlage 5.9: Höchste Tagessumme der Niederschlagshöhe (mit Datumsangabe, blaue Balken) in den Jahren 1951-1980, Station Eigenrieden, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1987).



Anlage 5.10: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1901-1950, Station Dingelstädt, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1978).



Anlage 5.11: Maxima der monatlichen Niederschlagssummen (mit Jahresangabe, blaue Balken) in den Jahren 1901-1950, Station Treffurt, im Vergleich zum langjährigen Mittel (LM, graue Balken) in diesem Zeitraum (Meteorologischer Dienst 1978).



Anlage 5.12: Höchste Tagessumme der Niederschlagshöhe (mit Datumsangabe, blaue Balken) in den Jahren 1999-2004, Station Eschwege, im Vergleich zum Mittelwert der jeweiligen Monate (graue Balken) in diesem Zeitraum (DWD 1999-2004).

# Geomorphologische Detailkartierung **A** Krajaer Kopf (Bleicheröder Berge)

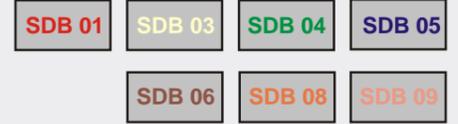
Anlage 6, Karte 1

Kartengrundlage: Topographische Karte M-32-22-C-a-3 Kraja 1:10 000  
(Ausgabe 1995, Stand 1985) Bearbeiter: I. Sahling 2006

HW 57 02 660  
RW 43 96 910

HW 57 02 935  
RW 43 97 240

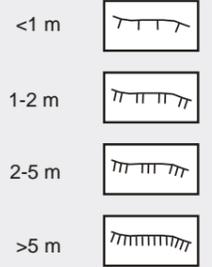
Standorte



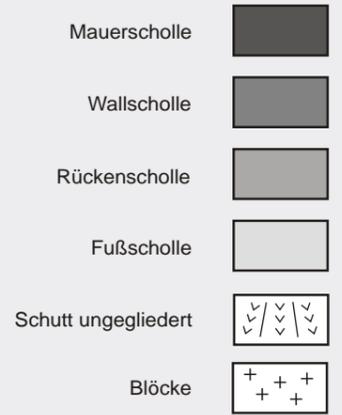
## Schichtstufenausbildung



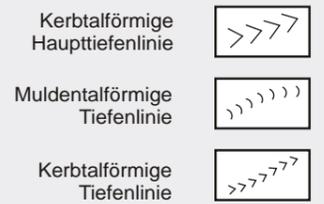
## Kleinstufen und Böschungen



## Formen der Massenbewegungen



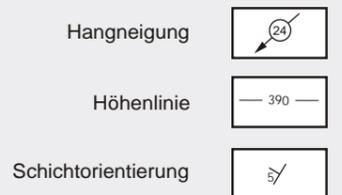
## Tiefenlinien



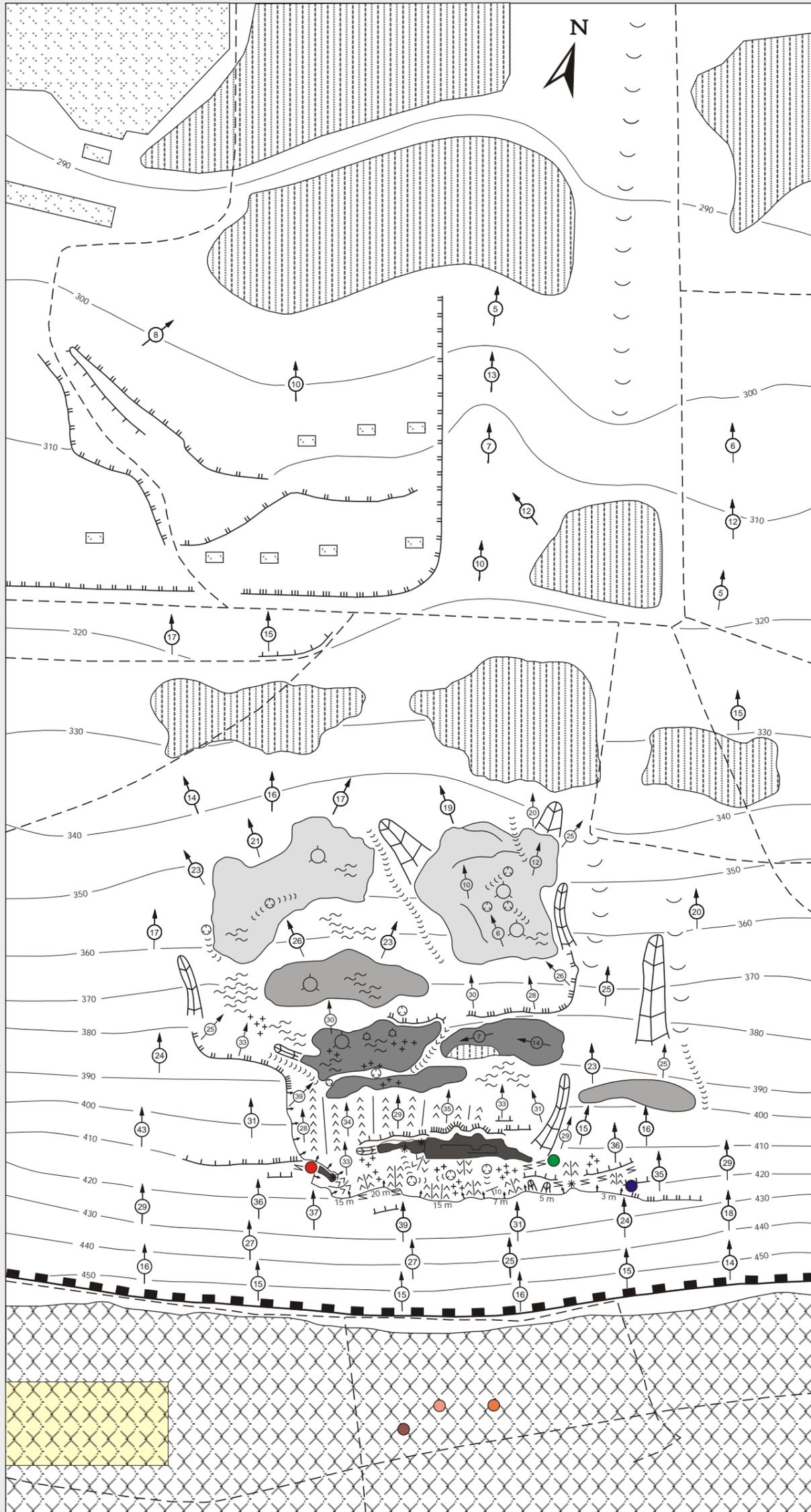
## Gestalt des Hanges



## Morphometrische Hangangaben



## Anthropogene Formen



HW 57 02 060  
RW 43 97 420

HW 57 02 330  
RW 43 97 755



Maßstab 1 : 2500

HW 56 92 675  
RW 43 96 000

HW 56 93 075  
RW 43 96 450

# Geomorphologische Detailkartierung **B** Vollenborn / Ost (Dün)

Anlage 6, Karte 2

Kartengrundlage: Topographische Karte M-32-22-C-c-3 Vollenborn 1:10 000  
(Ausgabe 1993, Stand 1993) Bearbeiter: M. Roßberg; I. Sahling 2006

Standorte

SDD05

SDD06

SDD07

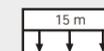
Schichtstufenausbildung



Frontstufe des Stufenhangtyps  
Trauf (100-150 m hoch)



Frontstufe des Stufenhangtyps  
Trauf mit Walm (100-150 m hoch)



Abrißwand mit Höhenangabe

Kleinstufen und Böschungen



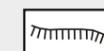
< 1 m



1-2 m

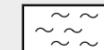


2-5 m



> 5 m

Gestalt des Hanges



Wellige Oberfläche



Hangverflachung



Stufenfläche



Rücken



Hohlform



Kanzel



Depression



Kuppe



Spalte

Formen der Massenbewegungen



Mauerscholle



Wallscholle



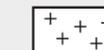
Rückenscholle



Fußscholle



Schutt ungegliedert



Blöcke

Morphometrische Hangangaben



Hangneigung



Höhenlinie



Schichtorientierung

Tiefenlinien



Muldentförmige  
Haupttiefenlinie



Kerbtalförmige  
Haupttiefenlinie



Muldentförmige  
Tiefenlinie



Kerbtalförmige  
Tiefenlinie

Anthropogene Formen



Weg

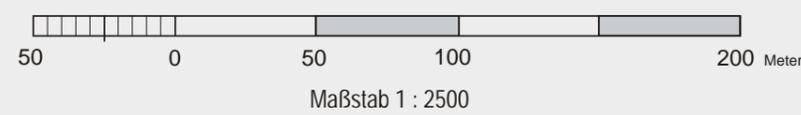


Bebaute Flächen



HW 56 92 225  
RW 43 96 375

HW 56 92 625  
RW 43 96 825



HW 56 92 400  
RW 43 95 700

HW 56 92 800  
RW 43 96 150

# Geomorphologische Detailkartierung **B** Vollenborn / West (Dün)

Anlage 6, Karte 3

Kartengrundlage: Topographische Karte M-32-22-C-c-3 Vollenborn 1:10 000  
(Ausgabe 1993, Stand 1993) Bearbeiter: M. Roßberg; I. Sahling 2006

Standorte (siehe Karte 2)



## Schichtstufenausbildung

- Frontstufe des Stufenhangtyps Trauf (100-150 m hoch)
- Frontstufe des Stufenhangtyps Trauf mit Walm (100-150 m hoch)
- Abrißwand mit Höhenangabe

## Kleinstufen und Böschungen

- < 1 m
- 1-2 m
- 2-5 m
- > 5 m

## Gestalt des Hanges

- Wellige Oberfläche
- Hangverflachung
- Stufenfläche
- Rücken
- Hohlform
- Kanzel
- Depression
- Kuppe
- Spalte

## Formen der Massenbewegungen

- Mauerscholle
- Wallscholle
- Rückenscholle
- Fußscholle
- Schutt ungegliedert
- Blöcke

## Morphometrische Hangangaben

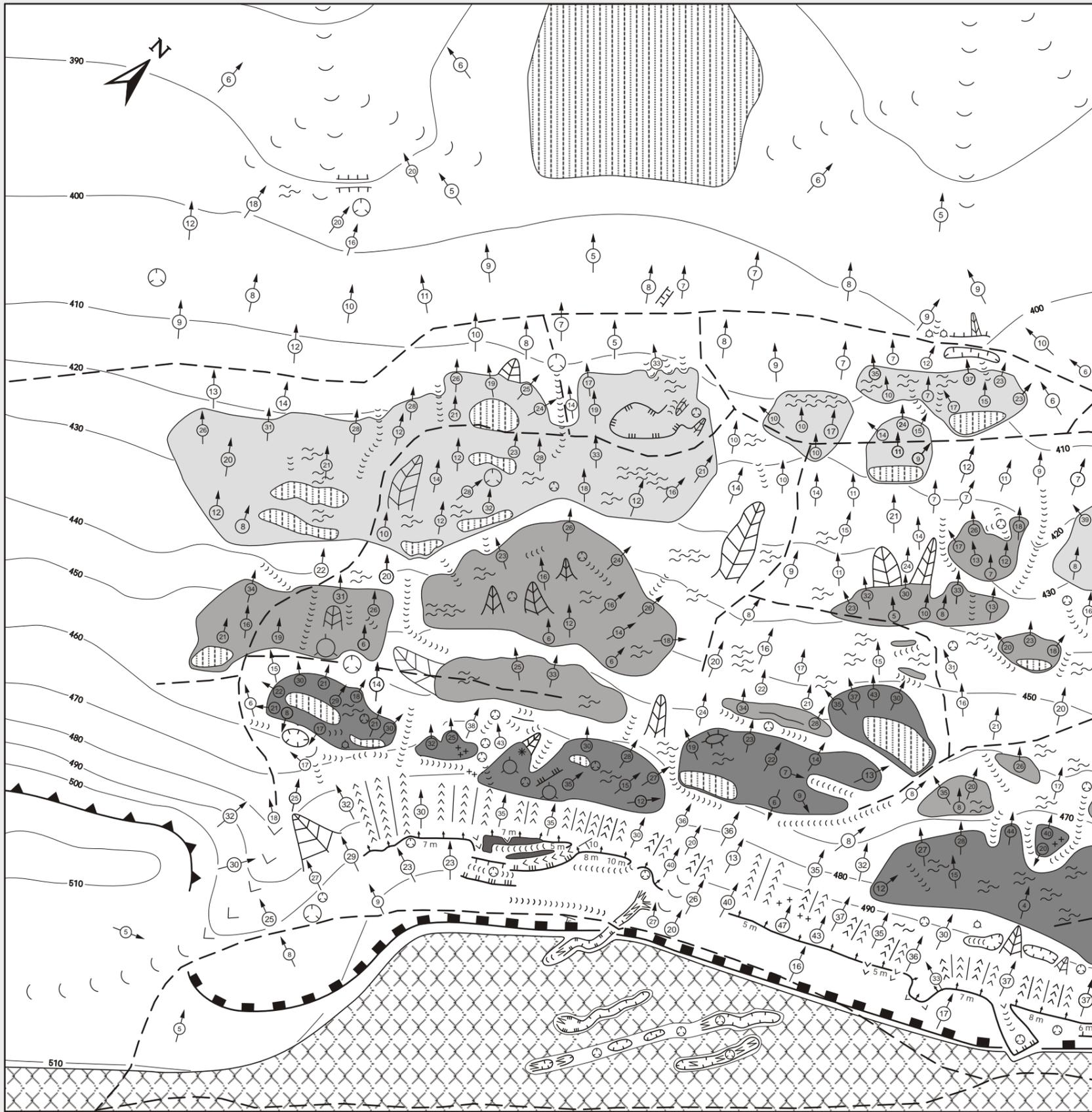
- Hangneigung
- Höhenlinie
- Schichtorientierung

## Tiefenlinien

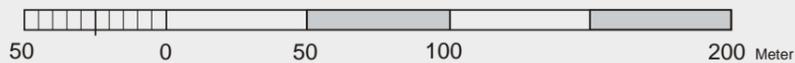
- Muldentalförmige Haupttiefenlinie
- Kerbtalförmige Haupttiefenlinie
- Muldentalförmige Tiefenlinie
- Kerbtalförmige Tiefenlinie

## Anthropogene Formen

- Weg
- Bebaute Flächen



HW 56 91 975  
RW 43 96 075



Maßstab 1 : 2500

HW 56 92 375  
RW 43 96 525

# Geomorphologische Detailkartierung Ritterholz (Dün)

Anlage 6, Karte 4

Kartengrundlage: Topographische Karte M-32-21-D-d-3 Niederorschel 1:10 000  
(Ausgabe 1992, Stand 1985) Bearbeiter: M. Roßberg; I. Sahling 2006

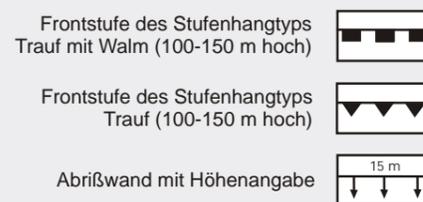
HW 56 91 500  
RW 35 98 025

HW 56 91 475  
RW 36 98 475

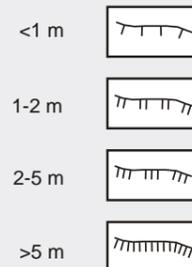
Standorte



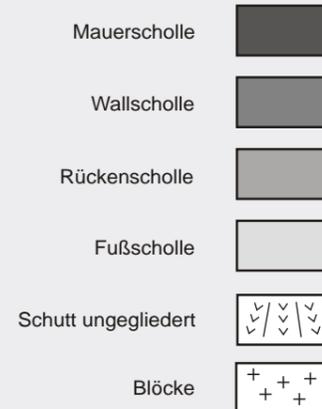
## Schichtstufenausbildung



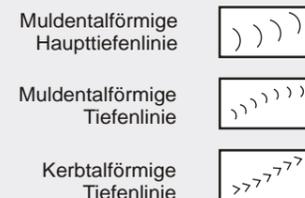
## Kleinstufen und Böschungen



## Formen der Massenbewegungen



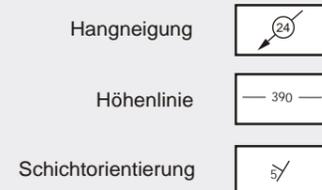
## Tiefenlinien



## Gestalt des Hanges



## Morphometrische Hangangaben



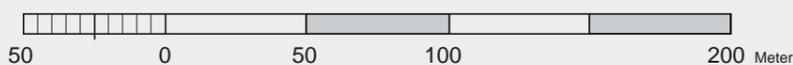
## Hydrographie



## Anthropogene Formen



HW 56 90 625  
RW 36 97 925



Maßstab 1 : 2500

HW 56 90 600  
RW 36 98 375

HW 56 91 150  
RW 35 96 950

HW 56 91 150  
RW 35 97 485

# Geomorphologische Detailkartierung **D** Grenzholz (Dün)

Anlage 6, Karte 5

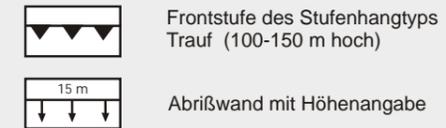
Kartengrundlage: Topographische Karte M-32-21-D-d-3 Niedersorschel 1:10 000  
(Ausgabe 1992, Stand 1985) Bearbeiter: I. Sahling 2006



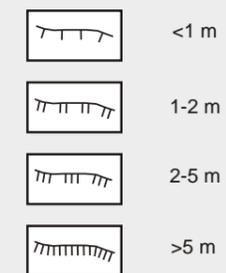
## Standorte



## Schichtstufenausbildung



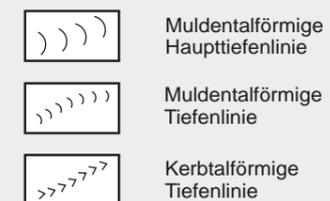
## Kleinstufen und Böschungen



## Formen der Massenbewegungen



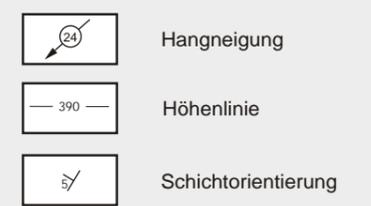
## Tiefenlinien



## Gestalt des Hanges



## Morphometrische Hangangaben



## Hydrographie



## Anthropogene Formen



HW 56 90 650  
RW 35 96 950

HW 56 90 650  
RW 35 97 485



Maßstab 1 : 2500

HW 56 81 600  
RW 35 82 200

HW 56 82 150  
RW 35 82 475

# Geomorphologische Detailkartierung Junkerholz Westerwald (Eichsfeld)

Anlage 6, Karte 6

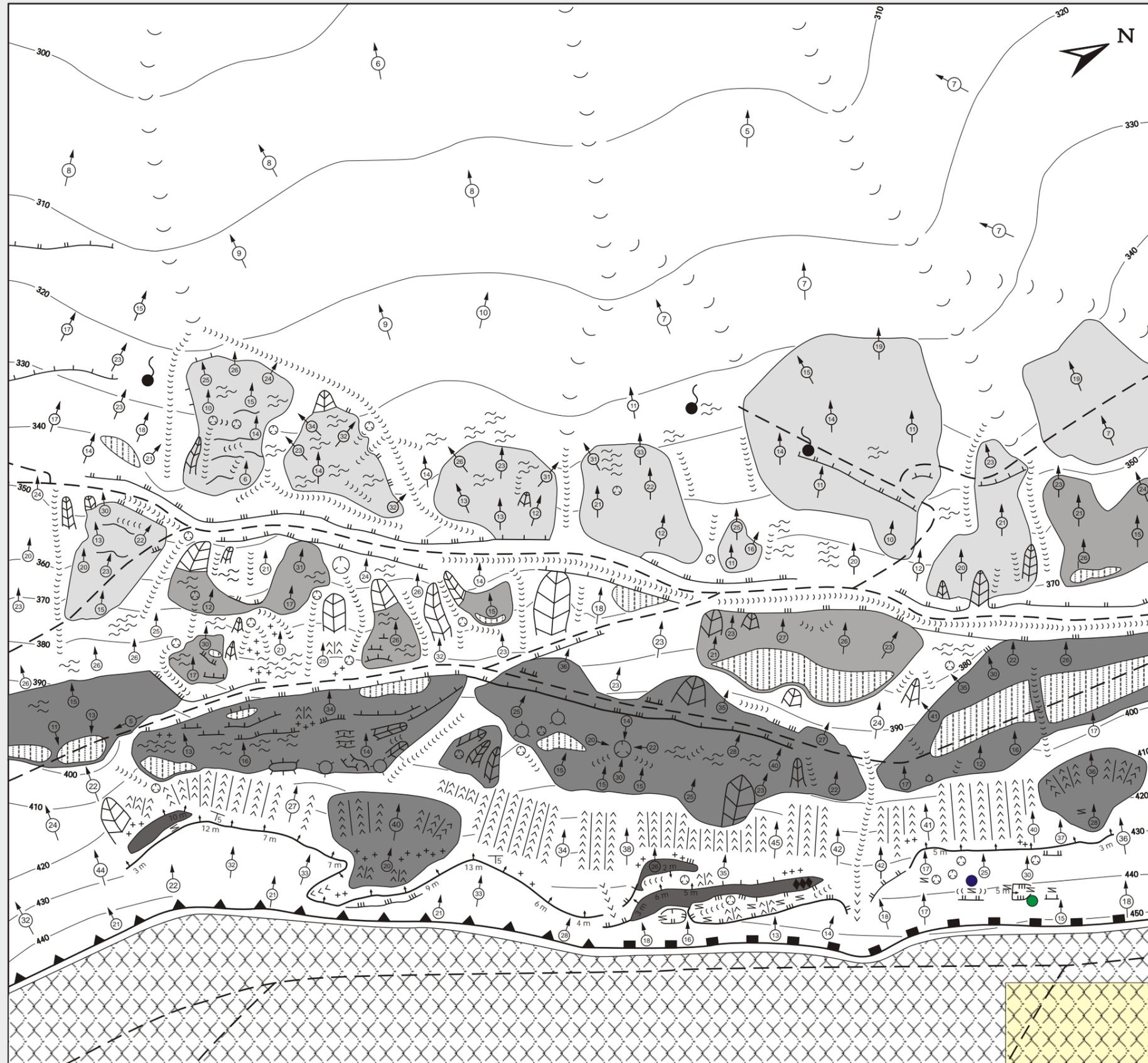
Kartengrundlage: Topographische Karten M-32-33-A-b-3 Ershausen 1:10 000  
M-32-33-A-b-4 Großbartloff 1:10 000 (Ausgabe 1993, Stand 1986)  
Bearbeiter: M. Roßberg; I. Sahling 2006

Standorte

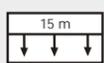
SDE01

SDE 10

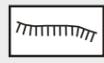
SDE 09



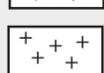
## Schichtstufenausbildung

-  Frontstufe des Stufenhangtyps  
Trauf mit Walm (100-150 m hoch)
-  Abrißwand mit Höhenangabe

## Kleinstufen und Böschungen

-  <1 m
-  1-2 m
-  2-5 m
-  >5 m

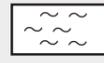
## Formen der Massenbewegungen

-  Mauerscholle
-  Wallscholle
-  Rückenscholle
-  Fußscholle
-  Schutt ungegliedert
-  Blöcke

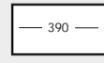
## Tiefenlinien

-  Muldentalförmige  
Haupttiefenlinie
-  Muldentalförmige  
Tiefenlinie
-  Kerbtalförmige  
Tiefenlinie

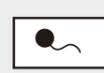
## Gestalt des Hanges

-  Wellige Oberfläche
-  Hangverflachung
-  Stufenfläche
-  Rücken
-  Grat
-  Hohlform
-  Kanzel
-  Depression
-  Kuppe
-  Spalte

## Morphometrische Hangangaben

-  Hangneigung
-  Höhenlinie
-  Schichtorientierung

## Hydrographie

-  Quelle

## Anthropogene Formen

-  Weg

HW 56 81 375  
RW 35 82 725

HW 56 81 925  
RW 35 82 975



# Geomorphologische Detailkartierung **F** Appental / Trefffurter Stadtwald (Ringau)

Anlage 6, Karte 7 Kartengrundlage: Topographische Karten M-32-33-C-b-4 Schnellmannshausen 1:10 000, M-32-33-D-a-3 Falken 1:10 000  
(Ausgabe 1993, Stand 1987) Bearbeiter: M. Roßberg; I. Sahling 2006

HW 56 64 900  
RW 35 87 550

HW 56 88 650  
RW 43 97 240

Standorte

SDT0101

SDT0102

## Schichtstufenausbildung

- Diagonalstufe des Stufenhangtyps  
Trauf mit Walm (100-150 m hoch)
- Achterstufe des Stufenhangtyps  
Trauf mit Walm (100-150 m hoch)
- Diagonalstufe des Stufenhangtyps  
Trauf (100-150 m hoch)
- Abrißwand mit Höhenangabe

## Kleinstufen und Böschungen

- <1 m
- 1-2 m
- 2-5 m
- >5 m

## Formen der Massenbewegungen

- Mauerscholle
- Absatzscholle
- Wallscholle
- Rückenscholle
- Fußscholle
- Schutt ungegliedert
- Blöcke

## Tiefenlinien

- Muldenförmige  
Haupttiefenlinie
- Muldenförmige  
Tiefenlinie
- Kerbtalförmige  
Tiefenlinie

## Gestalt des Hanges

- Wellige Oberfläche
- Hangverflachung
- Stufenfläche
- Rücken
- Depression
- Kanzel
- Grat
- Kuppe
- Spalte

## Hydrographie

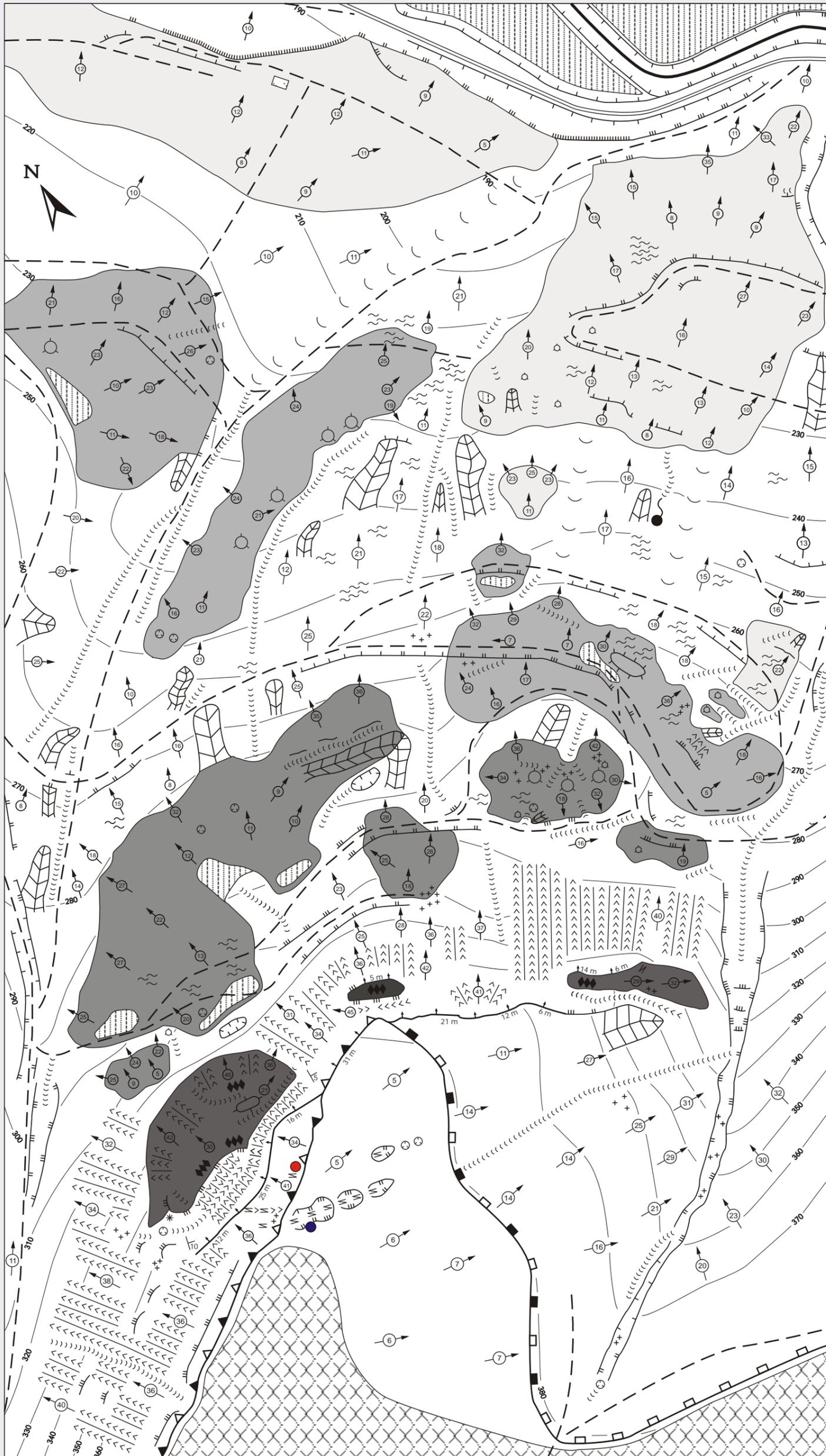
- Quelle
- Fließgewässer

## Morphometrische Hangangaben

- Hangneigung
- Höhenlinie
- Schichtorientierung

## Anthropogene Formen

- Straße
- Weg
- Bebaute Flächen



HW 56 64 200  
RW 35 87 075

HW 56 63 950  
RW 35 87 475



Maßstab 1 : 2500