Holzanatomische Veränderungen als Reaktion auf extreme Umweltereignisse in rezenten und subfossilen Eichen und deren Verifizierung im Experiment

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

Fakultät Naturwissenschaften
Universität Hohenheim

Institut für Botanik
AG Dendrochronologie

vorgelegt von
Alexander Land
aus Esslingen/N.

2014

Dekan:	Prof. Dr. rer. nat. Heinz Breer
Erste berichtende Person:	Prof. Dr. rer. nat. Manfred Küppers
Zweite berichtende Person:	Prof. Dr. rer. nat. Achim Bräuning
Dritte berichtende Person:	Prof. Dr. rer. nat. Klaus Haas

Eingereicht am: 13. November 2013
Mündliche Prüfung am: 03. März 2014

Die vorliegende Arbeit wurde am 20. November 2013 von der Fakultät Naturwissenschaften der Universität Hohenheim als „Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften“ angenommen.

Gewidmet
meinen lieben Eltern,
meiner Großmutter†
und meiner Frau,
als Dank für die große Unterstützung,
die Sie mir entgegen brachten.

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist über große Teile hinweg ohne jegliche finanzielle Förderung erstellt worden. Die Mitarbeit in einem DFG-Schwerpunktprogramm (INTERDYNAMIK) gab mir seit 2007 die Möglichkeit, Ergebnisse dieser Arbeit in die aktuelle Klimaforschung einfließen zu lassen. Die Fertigstellung dieser Arbeit lag ausnahmslos an der großen Unterstützung, die ich Seitens meines Umfeldes erfahren habe. Vielleicht mag man verstehen, wie tief mein Dank an die folgenden Personen und Institutionen gerichtet ist:

Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr. M. Küppers und Herrn Prof. Dr. A. Bräuning für die Vergabe des Themas und für die kritische Durchsicht dieser Arbeit.
Besonderen Dank geht an die MitarbeiterInnen des Instituts für Botanik. Besonders hervorgehoben werden müssen S. Liner, D. Reichle und I. Buck, die sich in jeder Lebenslage für mich einsetzten. R. Zimmermann und M. DeMol standen mir mit Rat und Tat stets zur Seite. Herrn I. Hans (damaliger Leiter des Botanischen Gartens) sowie M. Schurer, K.-H. Krnawek und den Mitarbeitern sei gedankt für die vortreffliche gärtnerische Arbeit, die Sie im „Drahtgewächshaus“ vollbracht haben.
Den Forst-Revierleitern, die eine schnelle und unbürokratische Probenentnahme möglich machten, gebührt mein tiefster Dank. Dr. V. Spät sei für anregende Tipps und Unterstützung an dieser Stelle gedankt. Danke auch den namenlosen MitarbeiterInnen der Landes- und Bundesämter für die Bereitstellung diverser Daten.
Dem Universitätsbund Hohenheim habe ich es zu verdanken, dass ich durch einen Reisekostenzuschuss meine Arbeit auf einem internationalen Kongress vorstellen konnte (Pan-American IAWA Meeting, San Luis Potosi, Mexico).
Herzlichst bedanken will ich mich bei Herrn Prof. Dr. E. Kienzle, der in sehr kurzer Zeit eine funktionierende Bildanalyse-Software entwickelte und bei aufgetretenen Problemen binnen kürzester Zeit Verbesserungen vorgenommen hat.
Assist. Prof. Dr. U. Sass-Klaassen und die MitarbeiterInnen des Institute of Forest Ecology and Forest Management nahmen mich während meines mehrmonatigen Aufenthalts herzlichst auf - ich hatte nie das Gefühl fremd zu sein. Dr. U. Sass-Klaassen danke ich besonders für kritische Anregungen und für die gute Zusammenarbeit. Dr. J. den Ouden wurde niemals müde meine Arbeit zu hinterfragen. Der C.T. De Wit Graduate School PE & RC, die diesen Aufenthalt finanziell unterstützte, sei für so viel wissenschaftliches Engagement über Landesgrenzen hinweg besonders gedankt.
Die aufopfernde Unterstützung der Arbeitsgruppe Dendrochronologie hat mich an meinen Zielen festhalten lassen. S. Remmele, A. Trebing-Niyazi, I. Boeren, S. Papenfuß, D. Reichle - größten Dank an Euch. M. Friedrich danke ich in besonderem Maße für sein unermüdliches Interesse an dieser Arbeit, den hilfreichen wissenschaftlichen Diskussionen und Hilfestellungen. Er stand mir mit seiner ganzen Erfahrung zur Seite.
Meinen Eltern und meiner Großmutter verdanke ich weit mehr als hier zu erwähnen möglich ist. Besonders hervorzuheben ist das grenzenlose Verständnis, das Sie mir immer entgegen brachten. Meiner Frau Katrin danke ich für die große Akzeptanz gegenüber meiner Arbeit und für unsere kleine Familie.

Stuttgart-Hohenheim, Oktober 2014

Alexander Land

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einleitung.....1

Kapitel 2 Material und Methoden.....5
2.1 Zur Biologie von *Quercus robur* L. und *Q. petraea* (Matt.) Liebl.....5

2.2 Kriterien für Standortauswahl, Probenmaterial, -entnahme und -anzahl für die Rezent-Studie.....7
2.2.1 Kriterien bei der Auswahl rezenter Standorte.....7
2.2.2 Übersicht über die rezenten Standorte.....8
2.2.3 Grundwasserversorgung rezenter Eichenbestände.....8
2.2.4 Probenmaterial, -entnahme und -anzahl an rezenten Standorten.....10
2.2.5 Forstliche Informationen über Rezent-Standorte.....11

2.3 Verwendetes subfossiles Eichenmaterial (HOC Hohenheim).....11

2.4 Präparation rezenter und subfossiler Holzproben.....13

2.5 Messung der Gesamtring-, Frühholz- und Spätholzbreite und Erstellung der Baummittelkurven.....13

2.6 Klimadaten und Wetteranomalien.....14
2.6.1 Klimadaten zur Berechnung der Wuchs-Klimabeziehungen für die rezenten Standorte.....14
2.6.2 Wetteranomalien zur Identifizierung von holzanatomischen Veränderungen..15
2.6.3 Klimadaten und Wetteraufzeichnungen für das Freiland- Experiment.....15

2.7 Alterstrend (Juveniltrend).....18

2.8 Statistische Verfahren.....19
2.8.1 Trendbereinigung, Indexierung und Chronologiebildung (Standardisierung) der Jahrring- bzw. Klimaparameter.....19
2.8.1.1 Standardisierung der Zeitreihen von Gesamtring-, Spätholz-, Frühholzbreite und holzanatomischen Variablen und Chronologiebildung.....19
2.8.1.2 Indexierung der Klimaparameter.....19
2.8.2 Korrelationsberechnungen zwischen den Jahrringchronologien und den Klimaparametern (Klima-Wuchsbeziehungen).....20
2.8.3 Statistische Jahrringparameter der Standortschronologien.....20
2.8.4 Berechnung der Klima-Wuchsbeziehungen.....24
2.8.5 Weiser- und Ereignisjahranalyse.....24

2.9 Beschreibung, Dokumentation und Datierung holzanatomischer Anomalien.....25
2.9.1 Holzanatomische Anomalien in rezenten Eichen.....25
2.9.2 Datierung holzanatomischer Anomalien.....25

2.10 Verifizierung holzanatomischer Anomalien im Freiland-Experiment.....26
2.10.1 Kriterien des Freiland-Experiments und der Versuchseichen.....26
2.10.2 Messungen der diametralen Stammzuwachsänderungen mittels Dendrometer.....27
2.10.3 Dokumentation der Freiland-Experimente und Probenentnahme.....29
2.10.4 Art und Umfang der simulierten Umweltereignisse im Freiland-Experiment..29
2.10.4.1 Simulation von Frost-Ereignissen zu Beginn der Vegetationsperiode...30
2.10.4.2 Simulation von Trockenstress während der Vegetationsperiode.....31

2.10.4.3 Simulation von Insektenkalamitäten (Defoliation).....31
2.10.4.4 Simulation von Hochwasser (Überflutung).....32

2.11 Messung der Querschnittsfläche von Frühholz-Tracheen mittels Bildanalyse-Software.....32
2.11.1 Messung der Querschnittsflächen von Frühholz-Tracheen an rezenten Eichen mittels einer semi-automatischen Bildanalyse-Software (TRIAS).....33
2.11.2 Messung der Querschnittsflächen von Frühholz-Tracheen an Versuchseichen.....36

2.12 Beschreibung der holzanatomischen Anomalien in rezenten Eichen.....37
2.12.1 Anomaliefreie holzanatomische Struktur des Jahrringes einer rezenten Eiche im Querschnitt.....37
2.12.2 Dichtebänder (Merkmale C, D, E).....38
2.12.3 Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F).....38
2.12.4 Traumatisches Gewebe (Merkmal T).....39
2.12.5 Abrupte Variation der Frühholzbreite (Merkmale A+, A-).....40
2.12.6 Fehlendes Spätholz (Merkmale N, N+).....40
2.12.7 Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV).....41
2.12.8 Traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G).....41
2.12.9 Lokale Verletzungen (Merkmal V).....42
2.12.10 Merkmalskombinationen.....43

2.13 Beschreibung der holzanatomischen Anomalien in subfossilen Eichen der Holozänen Eichen-Jahrringchronologie (HOC) Hohenheim.....43
2.13.1 Dichtebänder (Merkmal C, D, E).....44
2.13.2 Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F).....44
2.13.3 Traumatisches Gewebe (Merkmal T).....45
2.13.4 Abrupte Variation der Frühholzbreite (Merkmal A+, A-).....45
2.13.5 Fehlendes Spätholz (Merkmal N, N+).....45
2.13.6 Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV).....46
2.13.7 Vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G).....47
2.13.8 Lokale Verletzungen (Merkmal V).....47
2.13.9 Merkmalskombinationen.....48

2.14 Zusammenfassende Kurzübersicht holzanatomischer Anomalien in rezenten und subfossilen Eichen.....48

Kapitel 3 Ergebnisse.....49
3.1 Expressed Population Signal (EPS).....49
3.1.1 EPS von Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite.....50
3.1.2 EPS der Frühholz-Variablen.....51

3.2 Fernkorrelation zwischen den rezenten Jahrringchronologien.....53

3.3 Alterstrend-Verlauf (Juveniltrend) an den rezenten Standorten.....56

3.4 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klima- und den Jahrring-Parametern Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite rezenter Eichen.....58
3.4.1 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klimaparametern und der Gesamtringbreite rezenter Eichen.....58
3.4.2 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klimaparametern und der Spätholzbreite rezenter Eichen.....60
3.4.3 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klimaparametern und der Frühholzbreite rezenter Eichen.....61
3.4.4 Intervall-Korrelationen zu Klima-Wuchsbeziehungen.....62

3.5 Einfluss von Klima und Witterung auf ausgewählte holzanatomische Frühholz-Variablen rezenter Eichen.....64
3.5.1 Synchronität der Chronologien von holzanatomischen Frühholz-Variablen zwischen den untersuchten Regionen an Main, Rhein und Donau.....64
3.5.2 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen holzanatomischen Frühholz-Variablen rezenter Eichen und langreihigen (kontinuierlichen) Klimazeitreihen.....66
3.5.3 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen holzanatomischen Frühholz-Variablen rezenter Eichen und klimatischen (nicht-kontinuierlichen) Einzelereignissen..68

3.6 Ausprägung holzanatomischer Anomalien in Abhängigkeit von Baumalter, Stammhöhe und Standort.....72
3.6.1 Ausprägung holzanatomischer Anomalien in Abhängigkeit vom Baum- (Mark-) Alter.....72
3.6.2 Holzanatomische Anomalien und deren Abhängigkeiten vom Standort.....74
3.6.3 Stammquerschnitts-Kontinuität holzanatomischer Anomalien.....75
3.6.4 Stammhöhen-Kontinuität holzanatomischer Anomalien.....75
3.6.5 Häufigkeit und Homogenität holzanatomischer Anomalien an den Rezent-Standorten.....77

3.7 Simulation biotischer und abiotischer Umweltereignisse und deren Auswirkungen auf die Holzanatomie in Eichen im Freiland-Experiment (Verifikationsphase).....78
3.7.1 Radialer Zuwachs der Versuchseichen.....79
3.7.2 Verteilung der holzanatomischen Anomalien entlang der Stammhöhe.....82
3.7.3 Auswirkung von Entlaubung (simulierter Insektenfraß) auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs.....83
3.7.4 Auswirkung von künstlich erzeugtem Trockenstress auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs.....88
3.7.5 Auswirkung von Frost auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs.....91
3.7.6 Auswirkung von simulierter Überflutung auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs.....95

3.8 Einfluss von simuliertem Hochwasser (Überflutung) auf die Querschnittsfläche der Frühholz-Gefäße in Eichen des Freiland-Experiments.....100

3.9 Vergleich der dendrometrischen Befunde aus unterschiedlichen Behandlungen. 103
3.9.1 Vergleich der Wachstumsdynamiken von Kontroll- und Versuchseichen.....103
3.9.2 Die Wirkung von Wasserdefizit (Luft) auf den diametralen Stammzuwachs. 106
3.9.3 Vergleichende Betrachtung der Auswirkung experimenteller Behandlung auf Parameter des Stammdurchmessers.....107

3.10 Holzanatomische Anomalien in rezenten Eichen und mögliche Zusammenhänge mit biotischen und abiotischen Umweltereignissen (Rezent-Studie).....111
3.10.1 Kalamitäten durch Insektenbefall (Defoliation) und deren mögliche Folgen auf die Holzanatomie rezenter Eichen.....112
3.10.2 Perioden mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen (Trockenperioden) und deren mögliche Folgen auf die Holzanatomie rezenter Eichen.....113
3.10.3 Tiefe (Extrem-)Temperaturen bzw. spontane Temperaturstürze und deren mögliche Folgen für die Holzanatomie rezenter Eichen.....119
3.10.3.1 Tiefe (Extrem-)Temperaturen bzw. spontane Temperaturstürze zu Beginn der Vegetationsperiode (April / Mai).....119
3.10.3.2 Tiefe (Extrem-)Temperaturen bzw. spontane Temperaturstürze während der Vegetationsperiode (Juni / Juli).....126
3.10.4 Überflutung und mögliche Folgen für die Holzanatomie rezenter Eichen....128

3.11 Weiserjahr-Analyse holzanatomischer Anomalien von Früh- und Spätholzbreiten rezenter Eichen auf lokaler, regionaler und überregionaler Ebene.....134
3.11.1 Analyse regional und überregional auftretender holzanatomischer Anomalien zur Erfassung von Anomalie-Weiserjahre.....134
3.11.2 Analyse von Chronologien aus rezenten Eichenpopulationen auf Früh- und Spätholzbreiten-Weiserjahre.....137
3.11.2.1 Zuordnung von Spätholz- bzw. Frühholz-Weiserjahren zu abiotischen und biotischen Extrem-Ereignissen in der Region Main....140
3.11.2.2 Zuordnung von Spätholz- bzw. Frühholz-Weiserjahren zu abiotischen und biotischen Extrem-Ereignissen in der Region Rhein...141

3.12 Zusammenfassung der Zusammenhänge zwischen holzanatomischen Anomalien und auslösenden Umweltereignissen.....142

3.13 Ereignisdatierung mittels holzanatomischen Anomalien anhand subfossiler Eichen der HOC Hohenheim – Potenzial und Beitrag zur Klimaforschung.....144
3.13.1 Datierung von extrem kalten winterlichen Frostphasen am Oberrhein und Analyse ihrer zeitlichen Verteilung innerhalb einer 130-jährigen Periode des Holozäns.....145
3.13.2 Datierung und Analyse der zeitlichen Verteilung von Winter- und Frühjahrs- bzw. Sommer-Hochwasser im Maintal innerhalb einer über 1.000-jährigen Periode des Holozäns („4.7k-Event“).....146
3.13.3 Im Maintal während der Vegetationsperiode aufgetretene Fröste – Datierung und zeitliche Verteilung über eine 1.000-jährige Periode des Holozäns.....150

Kapitel 4 Diskussion.....152
4.1 Kontinuierliche holzanatomische Veränderungen und deren Potenzial für die Klimarekonstruktion.....153

4.2 Diskontinuierliche holzanatomische Veränderungen (holzanatomische Anomalien) und deren Potenzial für die Ereignisdatierung.....160

4.3 Datierung extremer Umweltereignisse aus dem Holozän.....166

Fazit.....169

Zusammenfassung.....171

Summary.....174

Literatur.....177

Anhang.....188

Curriculum vitae.....230

Erklärung.....232

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Traubeneiche, *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.....5
Abb. 2-2: Stieleiche, *Quercus robur* L.....6
Abb. 2-3: Natürliche Verbreitung von Trauben- und Stieleiche.....6
Abb. 2-4: Lage der Standorte und Klimastationen.....10
Abb. 2-5: Belegung regionaler Eichen-Chronologien (HOC Hohenheim).....12
Abb. 2-6: Tagesmaximum-Temperatur und Wasserdefizit im Jahr 2006.....17
Abb. 2-7: Drahtgewächshaus mit Versuchseichen.....27
Abb. 2-8: Messung zur diametralen Dickenänderung am Stamm.....28
Abb. 2-9: Einteilung des Stammquerschnittes der Versuchseichen.....29
Abb. 2-10: Experiment zum Trockenstress.....31
Abb. 2-11: Simulation eines Frühjahr-Hochwassers.....32
Abb. 2-12: Prozessabfolge der Bildanalyse-Messungen.....35
Abb. 2-13: Typische ringporige Jahrringstruktur im Kernholz einer Eiche.....37
Abb. 2-14: Dichteband im Spätholz (Merkmal D).....38
Abb. 2-15: Verformte oder kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F).....39
Abb. 2-16: Traumatisches Gewebe (Merkmal T).....39
Abb. 2-17: Abrupte Verbreiterung der Frühholzbreite (Merkmal A+).....40
Abb. 2-18: Reduktion des Spätholzes (Merkmal N).....41
Abb. 2-19: Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV).....41
Abb. 2-20: Traumatisch vergrößerte Tracheen im Spätholzbereich (Merkmal G).....42
Abb. 2-21: Dichteband Ende Frühholz (Merkmal C).....44
Abb. 2-22: Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F).....44
Abb. 2-23: Abrupte Variation der Frühholzbreite (Merkmal A+).....45
Abb. 2-24: Fehlendes Spätholz (Merkmal N / N+).....46
Abb. 2-25: Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV).....46
Abb. 2-26: Traumatisch vergrößerte Tracheen im Spätholzbereich (Merkmal G).....47
Abb. 2-27: Lokale Verletzung (Merkmal V).....47
Abb. 3-1: EPS der Gesamtring-, Spätholz- und Frühholz-Chronologie.....50
Abb. 3-2: EPS der Frühholz-Parameter MVA, MVA5, CAabs.....52
Abb. 3-3: Fernkorrelation Gesamtring-, Spätholz- und Frühholz-Chronologien.....53
Abb. 3-4: Fernkorrelation der Spätholz-Chronologien.....55
Abb. 3-5: Alterstrend-Verlauf der Gesamtringbreiten-Chronologien.....57

Abb. 3-6: Korrelationsberechnungen zwischen Gesamtringbreiten-Chronologien und verschiedenen Klimaparametern.....58

Abb. 3-7: Korrelationen zwischen Gesamtringbreiten-Chronologien und monatlicher Niederschlagssumme bzw. mittlerer monatlicher Abfluss.....59

Abb. 3-8: Korrelationsberechnungen zwischen Spätholzbreiten-Chronologien und verschiedenen Klimaparametern.....60

Abb. 3-9: Korrelationsberechnungen zwischen Frühholzbreiten-Chronologien und verschiedenen Klimaparametern.....61

Abb. 3-10: Intervall-Korrelation.....63

Abb. 3-11: Verläufe der standardisierten MVA5-Chronologien.....65

Abb. 3-12: Synchronverlauf April-Temperatur-Index und MVA5-Chronologie.....67

Abb. 3-13: Verlauf der MVA5-Chronologien an Main, Donau und Rhein.....69

Abb. 3-14: Verlauf der MVA5-Chronologien zur Februar-Temperatur.....70

Abb. 3-15: Gesamtringbreiten-Zuwachs der Versuchseichen.....80

Abb. 3-16: Gesamtringbreiten-Zuwachs der Versuchseichen je Simulationen.....81

Abb. 3-17: Gesamtringbreiten-Zuwachs der Versuchseichen je Simulationen.....82

Abb. 3-18: Stammdurchmesser einer Kontroll-Eiche während Vegetationsperiode.....85

Abb. 3-19: Stammdurchmesser einer Defoliationseiche während Vegetationsperiode.....87

Abb. 3-20: Dichteband (Merkmal D) im Spätholz einer Trockenstresseiche.....88

Abb. 3-21: Stammdurchmesser einer Trockenstresseiche während Vegetationsperiode. 90

Abb. 3-22: Traumatisches Gewebe (Merkmal T) in einer Frosteiche.....91

Abb. 3-23: Verformte/kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) einer Frost-Eiche.....92

Abb. 3-24: Stammdurchmesser einer Frosteiche während Vegetationsperiode.....94

Abb. 3-25: Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV) in Hochwasser-Eiche.....95

Abb. 3-26: Deformierte Frühholz-Trachee (Merkmal DEV) in Hochwasser-Eiche.....96

Abb. 3-27: Vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G) in Hochwasser-Eiche.....96

Abb. 3-28: Stammdurchmesser einer Hochwasser-Eiche während Vegetationsperiode. .98

Abb. 3-29: Querschnittsfläche der FH-Gefäße in Kontroll- und Hochwasser-Eichen.....100

Abb. 3-30: Querschnittsflächen der FH-Gefäße entlang Stammhöhe einer Kontroll- und Hochwasser-Eiche.....102

Abb. 3-31: Normierte Wachstumsdynamiken der Hochwasser-, Trockenstress, Defoliations- und Frost-Eichen gegenüber der Kontroll-Eiche.....104

Abb. 3-32: Tägliche Stammdurchmesseränderung einer Kontroll-, Hochwasser-, Trockenstress-, Defoliations- und Frost-Eiche im Vergleich zum täglichen Wasserdefizit der Luft.....106

Abb. 3-33: Tägliche absolute Stammzuwächse von Kontroll-, Hochwasser-, Trockenstress-, Defoliations- und Frost-Eichen.....109

Abb. 3-34: Stammzuwachs von Hochwasser- und Kontroll-Eiche.....110

Abb. 3-35: Box-Whisker-Plot der Spätholzbreiten rezenter Eichen 1974 bis 1978.....113
Abb. 3-36: Anomaliegramm des Merkmals N (fehlendes Spätholz).....114
Abb. 3-37: Abfluss am Pegel Schweinfurt (Main) in unterschiedlichen Jahren.....115
Abb. 3-38: Niederschlag und Wasserstand (März-August) von 1961 bis 1990.....116
Abb. 3-39: Temperatur und Niederschlag (Februar-Juli) des Jahres 1921.....118
Abb. 3-40: Anomaliegramm des Standortes Reutlingen 1 (Schwäbische Alb).....120
Abb. 3-41: Temperatur (März-Mai) im Jahr 1913.....121
Abb. 3-42: Verformte/kollabierte Frühholz-Tracheen in Rezent- und Versuchseiche.....122
Abb. 3-43: Temperatur (April-Juli) im Jahr 1953.....124
Abb. 3-44: Anomaliegramme Gundremmingen und Riedlingen.....125
Abb. 3-45: Temperatur (Mai-September) im Jahr 1980.....126
Abb. 3-46: Anomaliegramm Faulbach.....127
Abb. 3-47: Traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G) im Jahr 1999.....128
Abb. 3-48: Anomaliegramme Au 1, Au 2 und Leimersheim.....129
Abb. 3-49: Merkmal G in 150 und 400 cm Stammhöhe.....130
Abb. 3-50: Spätholz- und Frühholz-Zuwachs (1989-1999) entlang der Stammhöhe.....133
Abb. 3-51: Prozentuale Ausprägung markanter Anomalie-Weiserjahre.....135
Abb. 3-52: Analyse der Spätholzbreiten-Chronologien von 1900-2004.....139
Abb. 3-53: MVA5-Chronologie 2527-2396 BC.....145
Abb. 3-54: Jahrringbreiten-Chronologie subfossiler Eichen, Spätfrost- und Hochwasser-Ereignisse zwischen 3279 und 2201 BC („4.7k-Event“).....148
Abb. 3-55: Spätfröste-Häufigkeit am Main („4.7k-Event“).....151

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Wesentliche ökologische Eigenschaften von Stiel- und Traubeneiche.....7

Tab. 2-2: Liste der Standorte mit Standortskürzel.....9

Tab. 2-3: Stationen mit verfügbaren Klimaparametern.....14

T**ab. 2-4:** Meteorologische Informationen (April bis Oktober 2006).....18

Tab. 2-5: Anzahl an Dendrometern je Versuchstyp.....28

Tab. 2-6: Benennung und Beschreibung holzanatomischer Anomalien.....48

T**ab. 3-1:** Korrelationen zwischen FH-Variablen und langjährigen Klimazeitreihen.....68

Tab. 3-2: Winter-Temperaturen und Einbrüche in den MVA5-Chronologien an Main, Donau, Rhein.....71

T**ab. 3-3:** Markalters- und Standortsabhängigkeit holzanatomischer Anomalien.....73

Tab. 3-4: Auftreten von Dichtebändern (D, E) und traumatisch vergrößerten Spätholz-Tracheen (G) entlang der Stammhöhe.....76

Tab. 3-5: Vergleich von Versuchs- und Kontroll-Eichen unterschiedlicher Versuchstypen hinsichtlich verschiedener Parameter.....108

Tab. 3-6: Ausprägung des Merkmals G in den Jahren 1987 und 1999.....132

Tab. 3-7: Ursache einer spezifischen holzanatomischen Veränderung.....143

Tab. 3-8: Ursache einer Merkmalskombination.....143

Symbole, Einheiten, Formeln und Abkürzungen

a	Zeiteinheit Jahr
AD	Anno Domini
AK	Autokorrelation
BA	Blattaustrieb
BC	vor Christus; Before Christ
BE	Blattentfaltung
BP	vor 1950; Before Present
CAabs	absolute Leitquerschnittsfläche [mm²]; Absolute Conductive Area
Chr	Chronologie
D	Defoliation
DF	Defoliation im Frühjahr
DOY	Tag im Jahr; Day of Year
DS	Defoliation im Sommer
DSB	Tag nach Knospenbruch; Day since budbreak
EPS	Expressed Population Signal
F	Frost
FF	Frost im Frühjahr
FG	Fasergewebe
FH	Frühholz bzw. Frühholzbreite
FS	Frost im Sommer
GLK	Mittlere Gleichläufigkeit [%]
h	Zeiteinheit Stunde
HOC	Holozäne Eichen-Jahrringchronologie; Holocene Oak Chronology
HW	Hochwasser
HWF	Hochwasser im Frühjahr
HWS	Hochwasser im Sommer
KE	Kontroll-Eiche
MFH	Mittlere Frühholzbreite [mm/100]
MRW	Mittlere Gesamtringbreite [mm/100]; Mean Ring Width
MSH	Mittlere Spätholzbreite [mm/100]
mV	Millivolt
MVA	Mittlere Frühholz-Gefäßfläche [µm²]; Mean Vessel Area
MVA5	Mediane Fläche der größten 5 Gefäße aus erster Frühholz-Reihe [µm²]; Median Vessel Area of the 5 biggest
MS	Mittlere Sensitivität; Mean Sensitivity
MS_{Chr}	MS einer Chronologie

MS_E	MS einer Einzelkurve
n	(Ring-) Anzahl, Stichprobenumfang
PB	Parenchymatisches Band
r	Korrelationskoeffizient
$\bar{r}_{bt}$	Korrelation zwischen allen Jahrringbreiten
RW	Gesamtring, bzw. Gesamtringbreite
scPDSI	Trockenheits-Index; self-calibrating Palmer Drought Severity Index
SD	Standardabweichung; Standard Deviation
SH	Spätholz, bzw. Spätholzbreite
SHT	Spätholz-Trachee
T	Frühholz-Trachee
t	t-Wert (nach Baillie & Pilcher bzw. Hollstein)
TC	Tendenzwechsel [%]; Tendency Change
TRIAS	Programm zur Vermessung von Gefäßgrößen; Tree-Ring Image Analysis Software
TS	Trockenstress
TSAP	Jahrringmess-Programm; Time Series Analysis and Presentation
TSF	Trockenstress im Frühjahr
TSS	Trockenstress im Sommer
x_i	Ringbreite im Jahr i der ersten Zeitreihe
$\bar{x}$	Mittelwert der Ringbreiten (der ersten Jahrringkurve)
y_i	Ringbreite im Jahr i der zweiten Zeitreihe
$\bar{y}$	Mittelwert der Ringbreiten (der zweiten Jahrringkurve)

Liste der holzanatomischen Anomalien / Merkmale:

Merkmal A-/A+	Abrupte Variation der Frühholzbreite (Verringerung / Verbreiterung)
Merkmal C	Dichteband im Anschluss an das Frühholz
Merkmal D	Dichteband im Spätholz
Merkmal DEV	Deformierte Frühholz-Tracheen; Deformed Earlywood Vessel
Merkmal E	Dichteband am Ende des Spätholzes
Merkmal F	Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen
Merkmal G	Vergrößerte Spätholz-Tracheen
Merkmal N/N+	Fehlendes Spätholz in einem Jahrring / in 2-5 Jahrringen in Folge
Merkmal SEV	Schmale Frühholz-Tracheen; Small Earlywood Vessels
Merkmal T	Traumatisches Gewebe
Merkmal V	Lokale Verletzungen; Scars

Mittlere Ringbreite:

$$MRW\ ;MSH\ ;MFH = \frac{\sum_{i-1}^{n} x_i}{n}$$

mit n: Ringanzahl
x_i: Ringbreite im Jahr i

Mean Sensitivity:

$$MS = \frac{\sum_{i-1}^{n-1} |x_i - x_i + 1|}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \times \frac{n}{n-1} \times 100$$

mit n: Ringanzahl
x_i: Ringbreitenindex im Jahr i

Relative Abweichung:

$$rel.\ Abweichung = \frac{x_i \times 100}{\bar{x}} - 100$$

mit x_i: Monatsmittel im Jahr i
$\bar{x}$: Mittelwert über Gesamtzeitraum

Absolute Abweichung:

$$abs.\ Abweichung = x_i - \bar{x}$$

mit x_i: Monatsmittel im Jahr i
$\bar{x}$: Mittelwert über Gesamtzeitraum

t-Wert$_{\text{Baillie \& Pilcher}}$:

$$r = \sum (x_i - \bar{x}) \frac{(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

mit x_i: Ringbreite im Jahr i der ersten Zeitreihe
$\bar{x}$: Mittlere Ringbreite der ersten Jahrringkurve
y_i: Ringbreite im Jahr i der zweiten Zeitreihe
$\bar{y}$: Mittlere Ringbreite der zweiten Jahrringkurve

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

mit r: Korrelationskoeffizient
n: Ringanzahl

Expressed Population Signal:

$$EPS(n)=\frac{n\,\bar{r}_{bt}}{n\,\bar{r}_{bt}+(1-\bar{r}_{bt})}$$

mit n: Anzahl der korrelierten Bäume

$\bar{r}_{bt}$: Korrelation zwischen allen Jahrringmittelkurven

Stichprobenkorrelationskoeffizient:

$$r=\frac{\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i-\bar{x})^2\sum(y_i-\bar{y})^2}}$$

mit x_i: Ringbreite im Jahr i der ersten Zeitreihe

$\bar{x}$: Mittlere Ringbreite der ersten Jahrringkurve

y_i: Ringbreite im Jahr i der zweiten Zeitreihe

$\bar{y}$: Mittlere Ringbreite der zweiten Jahrringkurve

Kapitel 1 Einleitung

Seit Andrew E. Douglass (US-Amerikanischer Astronom) im Jahr 1901 den 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus mittels Jahrringen von Bäumen in vergangenen Zeiten rekonstruieren wollte, begann die Ausbildung eines neuen Wissenschaftszweiges - die Dendrochronologie. Die Dendrochronologie erlebte seit den 1970iger Jahren einen gewaltigen Aufschwung. Forscher unterschiedlicher Fachrichtungen (z.B. Biologen, Geografen, Physiker) nutzen noch immer dendrochronologische/-ökologische Methoden um verschiedenste wissenschaftliche Fragestellungen zu bearbeiten (z.B. Phipps, 1983; Nola, 1996; Bräuning, 1999; Billamboz, 2002; Friedrich et al., 2004; Pisek und Brázdil, 2006; Friedrich et al., 2006; Hitz et al., 2008; Sass-Klaassen et al., 2008).

Seit Anfang der 1970iger Jahre begann Bernd Becker in Hohenheim mit dem Aufbau einer Jahrringchronologie mit subfossilen Bäumen aus Flussschottern. Zu Beginn der 1980iger Jahre konnte er eine 9.000-jährige Jahrringchronologie subfossiler Baumstamm-ablagerungen vorweisen (Becker, 1983) und 10 Jahre später präsentierte er eine 11.000-jährige Eichen- und Kiefernchronologie zur Radiokarbonkalibration (Becker, 1993). Die Arbeiten B. Beckers wurden fortgeführt durch M. Spurk (Spurk et al., 1998; Spurk und Leuschner, 1999; Spurk et al., 2002) und M. Friedrich (Friedrich et al., 1999; Friedrich et al., 2001; Mayr et al., 2003; Friedrich et al., 2004). Die Holozäne Eichen-Jahrring-chronologie Hohenheim (=HOC Hohenheim) ist bekannt als die weltweit längste Jahrring-chronologie mit jährlicher/saisonaler Auflösung. Die Bedeutung und das Potenzial der HOC Hohenheim für die Klimaforschung wurde in diversen wissenschaftlichen Publikationen gezeigt (z. B. Becker und Schirmer, 1977; Becker, 1982; Becker, 1983; Becker et al., 1991; Becker, 1993; Spurk et al., 1998; Spurk und Leuschner, 1999; Friedrich et al., 1999; Friedrich et al., 2001; Spurk et al., 2002; Friedrich et al., 2004). Es zeigt sich aber ebenso, dass durch immer neue und verbesserte Methoden das Potenzial dieses einmaligen Archivs noch keines Wegs ausgeschöpft ist.

Untersuchungen holzanatomischer Anomalien und Variablen zur Klärung klimatischer /ökologischer Fragestellungen, ebenso wie die Datierung von extremen Umwelt-ereignissen (z.B. Hochwasser, Sommer-Trockenheit, Insektenkalamitäten), intensivierten

sich in den letzten zwei Jahrzehnten. Holzanatomische Arbeiten und deren Potenzial zu aktuellen Fragestellungen zeigen verschiedenste Autoren auf. So konnten Masiokas und Villalba (2004) Dichtebänder in *Nothofagus pumilio* aus Süd-Patagonien dortigen trockenen Frühjahren gefolgt von heißen Sommern zuordnen. LaMarche und Hirschboeck (1984) und D' Arrigo et al. (2001) synchronisierten das Auftreten von Frostringen mit großen Vulkaneruptionen. Astrade und Begin (1997) und St. George und Nielsen (2000) publizierten Arbeiten zur Veränderung der Holzanatomie in Eichen verursacht durch Extrem-Hochwasser an der Saone (Frankreich) und am Red River (Kanada). Yanosky (1983) und Yanosky und Jarret (2002) stellten anhand holzanatomischer Studien eine Chronik historischer Hochwasser am Potomac River (USA) auf.

Studien zu Veränderungen in den Querschnittsflächen von Frühholz-Tracheen (holzanatomische Variablen) und deren Klimasignal finden sich vermehrt seit dem Einzug leistungsfähiger Computer und haben der Dendrochronologie neue Perspektiven für die Klimaforschung und der Datierung von Umweltereignissen eröffnet (z.B. Woodcock, 1989; Sass und Eckstein, 1995; Pumijumnong und Park, 1999; St. George und Nielsen, 2002; García-González und Eckstein, 2003; Fonti et al., 2007; Blanchard, 2008; Fonti et al., 2009b).
Holzanatomische Studien, kombiniert mit den klassischen Methoden der Dendrochronologie/-ökologie, sind somit zu einem unverzichtbaren Bestandteil in der Umwelt- und Klimaforschung geworden.

Die vorliegende Arbeit ist eng mit der Holozänen Eichen-Jahrringchronologie (HOC) Hohenheim verknüpft. Sie soll als Grundlage gesehen werden, die subfossilen Eichen der HOC Hohenheim auf holzanatomischer Basis auswerten zu können. Die Zuordnung einer holzanatomischen Veränderung zu einem spezifischen Umweltereignis – und dessen exakter zeitlicher Datierung – in den vergangenen Jahrtausenden des Holozäns, würde einen wichtigen Beitrag zur Diskussion über die Variabilität des Klimas in der Vergangenheit leisten können.

Folgende Fragen stehen daher hier im Fokus:

- Signal-Übertragbarkeit: Finden sich in subfossilen Eichen der Holozänen Eichen-Jahrringchronologie (HOC) Hohenheim die gleichen holzanatomischen Anomalien bzw. Merkmalskombinationen wie in rezenten (lebenden) Eichen Süddeutschlands?
- Kann eine spezifische holzanatomische Veränderung einem Umweltereignis ursächlich zugeordnet werden?
- Treten Kombinationen holzanatomischer Merkmale auf, und wie sind diese zu interpretieren? Geben solche Merkmalskombinationen gesicherte Hinweise auf ein singuläres Umweltereignis oder basieren diese auf mehreren biotischen und/oder abiotischen nicht trennbaren Ursachen?
- Können holzanatomische Anomalien subfossiler und rezenter Eichen unter kontrollierten Bedingungen im Freiland-Experiment (Botanischer Garten, Universität Hohenheim) verifiziert werden?
- Tragen holzanatomische Frühholz-Variablen (z.B. mittlere Frühholz-Gefäßfläche) zusätzliche Klimainformationen, die nicht in den klassischen Ringbreiten-Parametern codiert sind?
- Können holzanatomische Anomalien bzw. Variablen in subfossilen Eichen der HOC Hohenheim genutzt werden, um einen Beitrag zur aktuellen Klimaforschung und Diskussion über das Klima der Vergangenheit zu leisten?

Zur Klärung dieser Untersuchungsfragen wurden rezente (lebende) Eichen an Standorten in den Gebieten des Mains, des Oberrheins, der Donau und der Schwäbischen Alb in Süddeutschland (siehe Karte mit Lage der Standorte auf Seite 10) beprobt und jahrring-analytisch bzw. holzanatomisch untersucht. Die holzanatomischen Anomalien dieser rezenten Eichen wurden zunächst mit holzanatomischen Veränderungen subfossiler Eichen der HOC Hohenheim aus unterschiedlichen Zeiträumen verglichen, um Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede herauszuarbeiten. Die Ursachenklärung zum Auftreten holzanatomischer Veränderungen rezenter Eichen erfolgte durch den Abgleich mit abiotischen Parametern (Temperatur, Niederschlag, Hochwasser, Trockenperiode, Frost etc.) sowie biotischer Ereignisse (Defoliation, Eichelmastjahre etc.).

Durch enge internationale und nationale Kooperationen ist eine Bildanalyse-Software (TRIAS) entwickelt worden, die speziell auf die subfossilen Eichen der HOC Hohenheim zugeschnitten ist. Mit dieser Bildanalyse-Software gelang es – durch halb-automatische

Bedienschritte – holzanatomische Frühholz-Variablen (Frühholz-Parameter) in rezenten und subfossilen Eichen in großer Serie mit moderatem Zeitaufwand zu vermessen. Die Zeitreihen jährlicher Frühholz-Variablen (z.B. mittlere Querschnittsfläche der Frühholz-Gefäße, Gefäßdichte, maximale Querschnittsfläche) sind zur Berechnung kontinuierlicher und nicht-kontinuierlicher Klima-Wuchsbeziehungen herangezogen worden.

Parallel hierzu erfolgte ein Freiland-Experiment mit getopften Eichen im Botanischen Garten der Universität Hohenheim. An diesen Eichen wurden Hochwasser, Trockenstress, Frost oder Defoliation (Kalamitäten) simuliert, um holzanatomische Anomalien der Subfossil- und Rezentstudie zu verifizieren. Begleitet wurden die Untersuchungen durch Messungen des diametralen Stammzuwachses (Dendrometer), die ergänzende Informationen über Wachstumsdynamiken vor, während und nach den Simulationen lieferten.

Kapitel 2 Material und Methoden

2.1 Zur Biologie von *Quercus robur* L. und *Q. petraea* (Matt.) Liebl.

„Die Gattung der Eichen (*Quercus* L., Familie der Buchengewächse, Fagaceae) ist auf der Nordhalbkugel heimisch und umfasst etwa 500 Arten mit zahlreichen Bastarden. Das Verbreitungszentrum liegt in Nordamerika, und eine grössere Anzahl von Arten kommen im Mittelmeergebiet und in Westasien vor. Südwärts sind einzelne Arten – wohl im Zuge der Eiszeiten - bis nach Ecuador und nach Indonesien vorgedrungen. Eichen sind immer- oder sommergrüne, bis über 50 m große und über 700 Jahre alt werdende Bäume oder Sträucher mit schuppiger Borke und knorrigen, unregelmäßigen und starkästigen Kronen; die Blätter sind gelappt oder gesägt. Besonders charakteristisch sind Fruchtbecher und die Gestalt der Frucht, die Eichel genannt wird“ (leicht verändert nach Bonfils et al., 2005).

„Die in Mitteleuropa heimischen Stiel- und Traubeneichen sind typische Vertreter der Weißeichen, wobei diese beiden Arten in weiten Bereichen gemeinsam vorkommen und zur Bastardisierung neigen, daher häufig nicht eindeutig zu differenzieren sind. Sie weisen Blätter mit abgerundetem Rand auf. Sie sind sogenannte Lichtbaumarten, d.h. sie benötigen im Wachstum mehr Licht als etwa die Rotbuche (jedoch weniger als Kiefern) und bilden selbst offene, lichte Kronen. Die Nutzung von Wäldern zur Waldweide (Hutewald) hat deshalb die Ausbildung von Eichenwäldern gefördert, weil die weidenden Tiere den Nachwuchs der Rotbuchen gehemmt haben; erstere spricht für deutlich unterschiedliche Standortansprüche bzw. ökologische Toleranzen. Das verkernende Holz der Weißeichen ist sehr dauerhaft und wurde viel im Schiffbau verwendet. Die heimischen Arten bieten etwa 350 Insektenarten einen Lebensraum“ (leicht verändert nach Aas, 1989).



Abb. 2-1: Traubeneiche, *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.

„Stieleiche und Traubeneiche ähneln sich sehr. Viele Systematiker und Genetiker sehen in der Traubeneiche nur eine Standortsrasse der Stieleiche. In der Verbreitung (Abb. 2-3) und der Morphologie gibt es jedoch einige Unterschiede: Die Stieleiche (Abb. 2-2) kommt vor allem in den Tiefebenen und den Auwäldern vor. Ihre Früchte sitzen zu wenigen an langen Stielen. Die Blätter sind nur kurz gestielt. Die Blattbasis ist herzförmig und geöhrt. Im mittleren Spreitenbereich der Blätter enden die Seitennerven auch in den Buchten. Die Knospen der Traubeneiche (Abb. 2-1) sind etwas schlanker als bei der Stieleiche“ (leicht verändert nach Aas, 1989).

„Die Traubeneiche (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) (Abb. 2-1) ist ein 25-30 Meter hoher Baum und erreicht Stammdurchmesser bis zwei Meter. Ihr Höchstalter liegt bei 500 Jahren. Die Baumkrone ist auf geradem Stamm hoch gewölbt mit strahlenförmig abgehenden Ästen, die viel gerader als bei der Stieleiche sind. Die Krone ist lockerer als bei der Stieleiche, und die Belaubung ist gleichmäßiger verteilt. Die Rinde der Traubeneiche ist in der

Jugend glatt und schwach grau-grün glänzend, später wird eine dicke, tief längsrissige, graubraune Borke gebildet“ (leicht verändert nach Krahl-Urban, 1959).

„Die Stieleiche (*Quercus robur* L.) (Abb. 2-2) ist ein 25-35 Meter hoher Baum und erreicht in Ausnahmefällen Stammdurchmesser bis sieben Meter. Stieleichenkronen sind gewöhnlich unregelmässiger verzweigt, ihre Äste sind stärker, knorriger und knickiger. Diese Eigenschaften treten bei alten Bäumen deutlich in Erscheinung. Die Kronen sind fast immer bukettartig aufgelöst, und die Äste stehen mehr waagerecht. Die Blätter sitzen im Gegensatz zur Traubeneiche büschelförmig, die größten und meisten an den Zweigenden. Der Lichtbedarf ist etwas größer, die Fähigkeit, Schatten zu ertragen, geringer. Vor allem die Borke ist gröber. Stieleichen erreichen mit Ausnahme der Eiben die höchsten Lebensalter von allen europäischen Bäumen“ (leicht verändert nach Krahl-Urban, 1959).

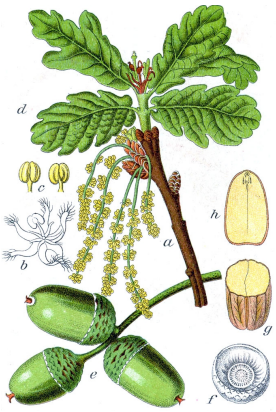


Abb. 2-2: Stieleiche, *Quercus robur* L.

„In Europa gibt es je nach Artkonzept 20 bis 30 verschiedene Eichenarten, die meisten davon im östlichen Mittelmeergebiet. Nach Norden zu nimmt die Artenzahl stark ab, so dass im zentralen Mitteleuropa nur noch vier und in Skandinavien nur noch zwei Eichen vorkommen (*Quercus robur* und *Q. petraea*) (Abb. 2-3), die beide nicht die boreale Zone am 60. Breitengrad erreichen“ (leicht verändert nach Krahl-Urban, 1959).

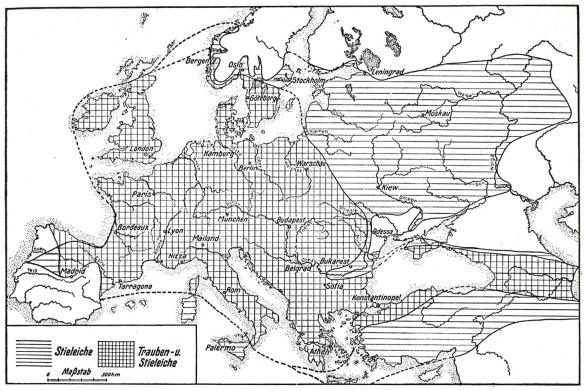


Abb. 2-3: Natürliche Verbreitung von Trauben- und Stieleiche (aus: Krahl-Urban, 1959).

Diese grobe Beschreibung der Artverteilung in Europa macht deutlich, dass es sich bei den Eichen um licht- und wärmeliebende, oft trockenheitsertragende Bäume handelt, die nicht an das Leben in kalten Klimazonen angepasst sind. Diese Eigenschaft zeigt sich deutlich auch im ökologischen Verhalten der Stiel- und Traubeneiche (Bonfils et al., 2005).

„Stiel- und Traubeneiche brauchen eine lange warme Vegetationsperiode. Die Stieleiche ist die weniger anspruchsvolle Art (Tab. 2-1). Weil sie Fröste und vernässte Böden besser erträgt, ist sie in Europa viel weiter verbreitet als die Traubeneiche, die auf ozeanisch geprägte Klimagebiete der subatlantisch-submediterranen Zone beschränkt ist“ (leicht verändert nach Bonfils et al., 2005).

Tab. 2-1: Wesentliche ökologische Eigenschaften von Stiel- und Traubeneiche (nach Bonfils et al., 2005).

Eigenschaft	Stieleiche	Traubeneiche
Konkurrenzkraft	mittel	mittel
Schattentoleranz (Jugend)	mittel	mittel
Wärmebedarf	hoch	hoch
Winterkälte	mäßig empfindlich	empfindlich
Spätfrost	mäßig empfindlich	empfindlich
Wasserversorgung	mäßig anspruchslos	anspruchslos
Trockenheit	mäßig empfindlich	wenig empfindlich
Vernässung	wenig empfindlich	empfindlich
Überschwemmung	mäßig resistent	wenig resistent
Nährstoffversorgung	mäßig anspruchslos	anspruchslos

2.2 Kriterien für Standortauswahl, Probenmaterial, -entnahme und -anzahl für die Rezent-Studie

2.2.1 Kriterien bei der Auswahl rezenter Standorte

Die Auswahl der Eichen (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), die in diese Arbeit eingingen, erfolgte nach verschiedenen Gesichtspunkten. Um ein möglichst breites Spektrum verschiedenartiger Klima- und Standorteinflüsse, wie z.B. Frühjahr-/Sommer- und Winterhochwasser, Sommertrockenheiten, Insektenkalamitäten, extreme Winter-/Frühjahr- und Sommertemperaturen, sowie unterschiedliche Baumalter in die Untersuchung einbeziehen zu können, fiel die Wahl auf Eichen von Rhein, Main, Donau, Schwäbischer Alb und Filderebene in Süddeutschland. Nicht zuletzt wurden die drei großen Flüsssysteme gewählt, um einen engen Bezug zur Hohenheimer Holozänen (=aktuelle Warmzeit) Eichen-Jahrringchronologie (HOC) herzustellen, die zum Großteil mit subfossilem Eichenmaterial aus fluvialen Schotterablagerungen dieser Flüsse erstellt wurde (Becker, 1982; Becker 1983; Becker, 1993).

Die Region Süddeutschland befindet sich in einem Grenzgebiet zwischen ozeanisch und kontinental geprägten Klimazonen. Dies führt dazu, dass milde, niederschlagsreiche ozeanische Winter ebenso vorkommen können wie warme, trockene kontinentale Sommer. Die Mittelgebirgslandschaften der Schwäbischen Alb mit teilweise sehr kalten Winter- aber moderaten Sommertemperaturen, stehen im Kontrast zu den Flusslandschaften der oberrheinischen Tiefebene und des Maintals, an denen aufgrund ihrer geographischen Lage und Flusstalbeschaffenheit mildere Winter und wesentlich höhere Sommertemperaturen vorherrschen können.

Um den Einfluss von extremen Umweltereignissen auf die Holzanatomie zu untersuchen, wurden gezielt solche rezente Bestände aufgesucht und beprobt, von denen Zeitpunkt, Art

und Dauer außergewöhnlich starker Umwelteinflüsse bekannt waren. Hierbei handelte es sich z.B. um Jahrhundert-Hochwasser an Rhein (z.B. 1987 und 1999) und Main (z.B. 1909), aber auch um rezente Bestände, die in bekannten Fluggebieten von Maikäfern (*Melolontha melolontha*) und Frostspannern (*Erannis defoliaria*) lagen. Um überdies vergleichende Untersuchungen anhand Klima- und Wetterdaten durchführen zu können, wurde im gleichen Maße auf das Vorhandensein von Klimastationen in (un-)mittelbarer Nähe mit möglichst langen Beobachtungszeiträumen geachtet. Diese Voraussetzungen konnten leider nicht bei allen beprobten Standorten erreicht werden.

2.2.2 Übersicht über die rezenten Standorte

Tabelle 2-2 gibt eine Übersicht der Standorte, die die Namen der nächstgelegenen Ortschaften tragen. In Tabelle 2-3 und in Abbildung 2-4 findet sich eine Übersicht zu den rezenten Standorten und deren Lage zu Klimastationen.

Die Standorte verteilen sich über die Region Süddeutschlands entlang der Flüsse Rhein, Main, Donau sowie der Schwäbischen Alb und der Filderebene. Ihre geographische Lage zeigt Abbildung 2-4 (rote Punkte).

2.2.3 Grundwasserversorgung rezenter Eichenbestände

Die Standorte (Abb. 2-4) lassen sich grob in drei Untergruppen einteilen: sehr gut, gut und schlecht bzw. nicht Grundwasser versorgt.

Die sehr gut von Grundwasser versorgten Standorte stammen aus den Hartholzauen von Rhein, Main und Donau bzw. von sehr nahe gelegenen Abschnitten, die teilweise nicht als naturnahe Hartholzauen angesprochen werden können, aber zweifelsohne als Grundwasser beeinflusst gelten, da der Abstand und die Lage zum Fluss keinen anderen Schluss zulassen (Au1, Au2, Au3, Baun, Dett, Esch, Euer, Fahr, Fin1, Fin2, Leim, Oppe, Rust1, Rust2, Wer1, Wer2).

Die schlecht bzw. nicht Grundwasser versorgten Bestände stammen von Süd- bis Südwest exponierten Hängen im Maintal, sowie von Südhängen der Schwäbischen Alb (Faul, Freu, Reu1, Reu2, Reu3). Diese können als extreme Trockenstandorte angesprochen werden.

Die gut Grundwasser versorgten Standorte finden sich in der oberrheinischen Tiefebene, der Filderebene und der Schwäbischen Alb (Lam1, Lam5, Lam8, Plie, Ried1, Ried2).

Tab. 2-2: Liste der Standorte mit Standortskürzel, Anzahl Bäume und Angaben zur Grundwasserversorgung (alphabetisch geordnet). - R.=Rhein; M.=Main; D.=Donau; S.A.=Schwäbische Alb; F.E.=Filderebene.

Nr.	Standort	Kürzel	Anzahl Bäume	Grundwasser-Versorgung
1	Au1/R.	Au1	4	sehr gut
2	Au2/R.	Au2	11	sehr gut
3	Au3/R.	Au3	4	sehr gut
4	Baunach/M.	Baun	9	sehr gut
5	Dettelbach/M.	Dett	11	sehr gut
6	Escherndorf/M.	Esch	8	sehr gut
7	Euerheim/M.	Euer	11	sehr gut
8	Fahr/M.	Fahr	6	sehr gut
9	Faulbach/M.	Faul	10	schlecht
10	Freudenberg/M.	Freu	11	schlecht
11	Gundremmingen1/D.	Fin1	15	sehr gut
12	Gundremmingen2/D.	Fin2	6	gut
13	Lampertheim1/R.	Lam1	7	gut
14	Lampertheim5/R.	Lam5	9	gut
15	Lampertheim8/R.	Lam8	4	gut
16	Leimersheim/R.	Leim	10	sehr gut
17	Oppenheim/R.	Oppe	17	sehr gut
18	Plieningen/F.E.	Plie	21	gut
19	Reutlingen1/S.A.	Reu1	11	schlecht
20	Reutlingen2/S.A.	Reu2	11	schlecht
21	Reutlingen3/S.A.	Reu3	11	schlecht
22	Riedlingen1/S.A.	Rie1	8	gut
23	Riedlingen2/S.A.	Rie2	4	gut
24	Rust/R.	Rust1	13	sehr gut
25	Rust/R.	Rust2	10	sehr gut
26	Wertheim1/M.	Wer1	4	sehr gut
27	Wertheim2/M.	Wer2	8	sehr gut

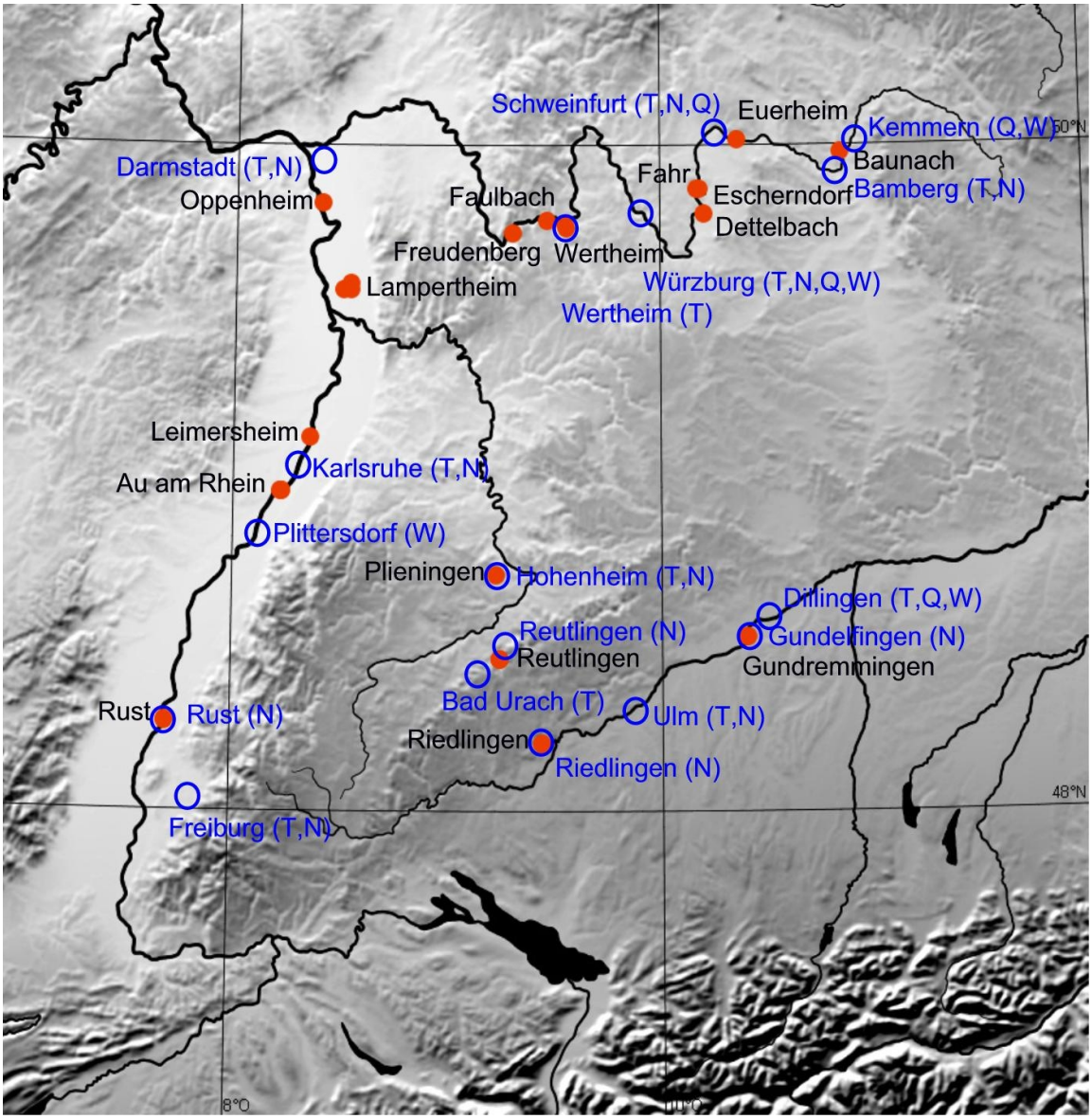


Abb. 2-4: Lage der Standorte (rote Punkte) und Klimastationen (blaue Kreise). - T=Temperatur; N=Niederschlag; Q=Abfluss; W=Wasserstand.

2.2.4 Probenmaterial, -entnahme und -anzahl an rezenten Standorten

Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden an Stiel- (*Quercus robur* L.) und Traubeneichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) durchgeführt. Das Probenmaterial stammte von früheren dendrochronologischen Untersuchungen aus dem Institut für Botanik der Universität Hohenheim, sowie von eigenen Probenentnahmen.

Die Probenentnahme erfolgte in Brusthöhe (ca. 130cm) mittels Zuwachsbohrer (Fa. Suunto, Vantaa, Finnland) unterschiedlicher Längen. Eine zusätzliche Entnahme entlang des Stammes (0 cm bis 400 cm) fand an einer einzelnen Eiche im Veldesgrund

bei Au am Rhein statt.
Bei der Probenentnahme wurde darauf geachtet, homogene und gesunde Bäume hinsichtlich Alter und sozialer Stellung zu beproben. Eine Probenentnahme im Reaktionsholz (vor allem an Bäumen an Steilhängen) wurde vermieden, indem hangparallel beprobt wurde.

Um juvenile (< 60 jährige) und adulte (> 60 jährige) Eichen in die Untersuchung einzubeziehen, fand eine Beprobung beider Altersklassen statt. Die Standorte juveniler Eichen sind zumeist geringer belegt (Au1, Au3, Baun, Fahr, Rie2, Wer2), da an manchen Standorten nur wenige Eichen zu finden waren. Die Anzahl der untersuchten Bäume je Standort schwankte daher zwischen 4 (Au am Rhein 3, Lampertheim 8) und 21 (Plieningen). Die Anzahl der in Brusthöhe gemessenen und untersuchten Radien je Baum betrug mindestens 2. Detaillierte Angaben über alle Einzelbäume sind dem Anhang ab Seite 188 zu entnehmen.

2.2.5 Forstliche Informationen über Rezent-Standorte

Informationen auf Bestandesniveau konnte von Forsteinrichtungen bezogen werden. Diese Daten enthielten Standortsinformationen über forstwirtschaftliche bzw. forstbauliche Eingriffe. Aufgrund der Forstreform gingen viele informelle Dokumente und die Kenntnisse der Forstleute unwiderruflich verloren. Es musste daher auch auf andere Quellen zurückgegriffen werden. Diese Quellen waren: die Landesversuchsanstalt (LVA) Freiburg, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) Baden-Württemberg, Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg und das Bayerische Landesamt für Umweltschutz.
Speziell für Unterfranken konnte auf eine 350 jährige Eichelmast-Chronologie (Schenk, 1993) zugegriffen werden, die zwar nicht die Eichelmast-Situation am Standort widerspiegelt, aber einen sehr guten regionalen Überblick über die Eichel-Produktion in Unterfranken gibt (mündliche Auskunft Herr Schenk, 2013).

2.3 Verwendetes subfossiles Eichenmaterial (HOC Hohenheim)

Die Holozäne Eichen-Jahrringchronologie (HOC=Holocene Oak Chronology) Hohenheim ist ein einzigartiges, jahrgenaues Archiv. Sie reicht derzeit von 8480 Jahre vor Christus (BC) bis heute (Abb. 2-5) (Friedrich et al., 2004) und ist damit die längste zusammenhängende Eichen-Jahrringchronologie der Welt.

B. Becker datierte seit 1970iger Jahren subfossile Baumstämme aus den Flüssen Main, Oberrhein, Regnitz und Donau und erstellte Jahrringkurven. Es folgten Beiträge und Publikationen, in denen die HOC Hohenheim im Mittelpunkt der Forschung stand.
Arbeiten zur postglazialen Flussgeschichte, insbesondere zum zeitlichen Ablauf der Bildung nacheiszeitlicher Auenstufen (z.B. Becker und Schirmer, 1977; Becker, 1982; Becker, 1983), zur Flussdynamik unter dem Einfluss des frühen Menschen (z.B. Spurk und Leuschner, 1999; Spurk et al., 2002) und Isotopen-Messungen (z.B. Becker et al., 1991; Becker, 1993; Friedrich et al., 1999; Friedrich et al., 2004; Friedrich et al., 2006) folgten. Die Hohenheimer Eichen- und Kiefern-Jahrringchronologie wurde zum Rückgrat der Holozänen Radiocarbon-Kalibrationskurve für Mitteleuropa (Friedrich et al., 2004), die zur Datierung von organischem Material dient.

Abbildung 2-5 zeigt die Anzahl der Eichen der HOC Hohenheim (Friedrich et al., 2004). Im Rahmen dieser Arbeit wurde subfossiles Eichenmaterial der HOC Hohenheim zur Erkennung und Beschreibung holzanatomischer Anomalien herangezogen. Hierzu wurden rund 250 subfossile Eichen von Rhein, Main und Donau auf auffällige, visuell erkennbare Veränderungen im Holzquerschnitt untersucht. Die Auswahl dieser subfossilen Eichen erfolgte mit dem Bestreben möglichst einen kompletten Eindruck aus verschiedenen Flüssen und Zeitabschnitten zu erhalten.

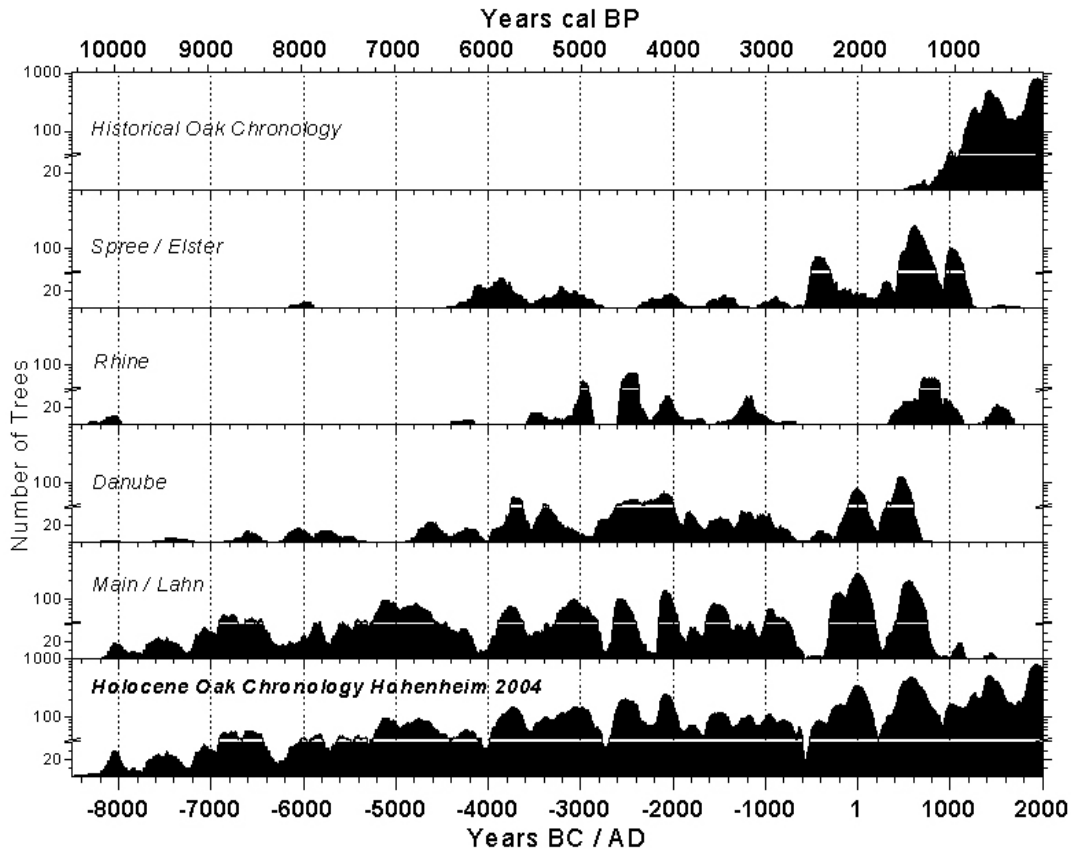


Abb. 2-5: Belegung (Anzahl von Bäumen über die Zeit) verschiedener regionaler Eichen-Chronologien der HOC Hohenheim in logarithmischer Darstellung. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde die Achse der Belegung bei 40 „unterbrochen“ (weiße Linie) (Friedrich et al., 2004).

Die subfossilen Eichen wurden – wenn nötig – neu präpariert (Kap. 2.4), und die Querschnittsfläche unter einem Auflicht-Binokular (Stemi 2000 CS, Carl Zeiss) bei fünf- bis 50-facher Vergrößerung durchgesehen.

2.4 Präparation rezenter und subfossiler Holzproben

Präpariert wurden die Holzproben durch Aufschnitzen der Querschnittsfläche mit Industrieklingen (Stärke: 0,13-0,15mm; MOZART AG, Solingen, Deutschland). Anschließendes Einreiben von Tafelkreide ergab ein sehr kontrastreiches Bild und fand bei rezentem und subfossilem Eichenmaterial Verwendung. Engringige Zuwachszonen und feine Jahrringstrukturen, wie holzanatomische Veränderungen (z.B. radial abgeflachte Spätholzzellen), ließen sich damit unter einem Auflicht-Binokular deutlich erkennen.

Für die Bildanalyse-Messungen an rezentem und subfossilem Eichenmaterial wurde ein leicht verändertes Präparations-Verfahren angewandt. Die Glättung der Querschnittsfläche wurde durch ein Schlittenmikrotom (Entwicklung Uni Hohenheim) erreicht. Der störende Einfluss der Thyllen konnte durch „zerstören“ mit Pressluft stark minimiert. Um einen möglichst starken Kontrast zwischen den Frühholzgefäßen (weiß) und dem Eichenholz (dunkel) zu erhalten, wurde Wert darauf gelegt, die Tafelkreide plan in die Poren einzureiben, damit die Ausbildung von Artefakten (z.B. Schattenränder) gering ausfiel.

2.5 Messung der Gesamtring-, Frühholz- und Spätholzbreite und Erstellung der Baummittelkurven

Die Eichenproben wurden am Institut für Botanik der Universität Hohenheim vermessen (für eine genaue Beschreibung des Messvorgangs siehe Land, 2003) und analysiert. Gemessen wurden Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite, die Messgenauigkeit betrug 1/100mm. Die einzelnen Messradien (2 pro Baum bei rezenten Eichen; 4 pro Stammhöhe bei Versuchseichen) wurden nach der Messung visuell in Synchronlage gebracht und gegenseitig überprüft. Es erfolgte eine arithmetische Mittelung der Einzelradien von Gesamtring (RW), Spätholz (LW) und Frühholz (EW) zu je einer Baummittelkurve.

Die Eiche gehört zu den ringporigen Baumarten, da die gegenüber dem Spätholz wesentlich größeren Gefäße der Frühholzzone ringförmig angeordnet sind. Holzzuwachs beginnt bei Eichen bereits vor/mit der Begrünung, die Kambiumtätigkeit nach Büsgen und Münch, (1927) sogar lange vor einer sichtbaren Veränderung der Knospen, in Mitteleuropa im allgemeinen zwischen der zweiten April- und der ersten Maihälfte, die Bildung von Spätholz nach vollständiger Belaubung (Krahl-Urban, 1959). Infolge unterschiedlicher Größe der Gefäße sind innerhalb der Jahrringe die Früh- und die Spätholzzone und auch die Jahrringe gegeneinander deutlich abgegrenzt. Bis zum heutigen Zeitpunkt gibt es kein standardisiertes Verfahren, anhand dessen eine exakte Früh-/Spätholzgrenze gezogen werden kann wie bei der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) (Mork, 1928). Die Früh-/Spätholzgrenze wurde an dem Punkt gesetzt, an dem sich die Tracheen-Querschnittsflächen in ihrer Größe drastisch veränderten (vgl. Land, 2003).

2.6 Klimadaten und Wetteranomalien

2.6.1 Klimadaten zur Berechnung der Wuchs-Klimabeziehungen für die rezenten Standorte

Für die Untersuchungen der Klima-Wuchsbeziehungen und des Einflusses klimatischer Extremjahre war es von entscheidender Wichtigkeit, langjährige Klimazeitreihen zu verwenden, die von Klimastationen in (un-)mittelbarer Nähe zum jeweiligen Standort aufgezeichnet wurden, da sich mit zunehmender Entfernung das Klima, hauptsächlich der Niederschlag, stark abweichen kann (Tessier, 1989). In der Praxis führte dies jedoch oft zu Schwierigkeiten, da in vielen Fällen Klimazeitreihen aus unmittelbarer Nähe vorhanden gewesen wären, sich aber als zu kurz für detaillierte Untersuchungen herausgestellt haben. Es musste ein Mittelweg gefunden werden, der es erlaubte, langjährige Klimazeitreihen - von Temperatur, Niederschlag bzw. Abfluss und Wasserstand - einzubeziehen, die gleichzeitig repräsentativ für die Standorte waren, und sich somit detaillierte Untersuchungen am langjährigen Probenmaterial durchführen ließen.

Tab. 2-3: Stationen mit verfügbaren Klimaparametern (Temperatur, Niederschlag, Abfluss, Wasserstand), Beobachtungszeiträume und Quellenangabe.

Standort	Station (Temperatur)	Station (Niederschlag)	Pegel (Abfluss / Wasserstand)	Quelle
Au1	Karlsruhe 1799-2006	Karlsruhe 1833-2006	Plittersdorf 1889-2003	Wetterzentrale/Wetterzentrale/Bundesamt f. Gewässerk., Koblenz
Au2	Karlsruhe 1799-2006	Karlsruhe 1833-2006	Plittersdorf 1889-2003	Wetterzentrale/Wetterzentrale/Bundesamt f. Gewässerk., Koblenz
Au3	Karlsruhe 1799-2006	Karlsruhe 1833-2006	Plittersdorf 1889-2003	Wetterzentrale/Wetterzentrale/Bundesamt f. Gewässerk., Koblenz
Baun	Bamberg 1961-2000	Bamberg 1961-2000	Kemmern 1949-2006/Kemmern 1964-2006	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Dett	Würzburg 1804-2006	Würzburg 1877-2006	Schweinfurt 1845-2004	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Esch	Würzburg 1804-2006	Würzburg 1877-2006	Schweinfurt 1845-2004	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Euer	Würzburg 1804-2006	Würzburg 1877-2006/Schweinfurt 1961-2003	Schweinfurt 1845-2004	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Fahr	Würzburg 1804-2006	Würzburg 1877-2006	Schweinfurt 1845-2004	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Faul	Würzburg 1804-2006/Wertheim 1961-2004	Würzburg 1877-2006		DWD/DWD
Fin1	Dillingen 1948-2002	Gundelfingen1931-2002/Ulm 1894-2002	Dillingen 1924-2006	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Fin2	Dillingen 1948-2002	Gundelfingen1931-2002/Ulm 1894-2002	Dillingen 1924-2006	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Freu	Würzburg 1804-2006/Wertheim 1961-2004	Würzburg 1877-2006		DWD/DWD
Lam1	Karlsruhe 1799-2006	Karlsruhe 1833-2006/Lampertheim 1951-2002		Wetterzentrale/Wetterzentrale
Lam5	Karlsruhe 1799-2006	Karlsruhe 1833-2006/Lampertheim 1951-2002		Wetterzentrale/Wetterzentrale
Lam8	Karlsruhe 1799-2006	Karlsruhe 1833-2006/Lampertheim 1951-2002		Wetterzentrale/Wetterzentrale
Leim	Karlsruhe 1799-2006	Karlsruhe 1833-2006	Plittersdorf 1889-2003	Wetterzentrale/Wetterzentrale/Bundesamt f. Gewässerk., Koblenz
Oppe	Darmstadt 1949-1986	Darmstadt 1931-1986	Plittersdorf 1889-2003	DWD/DWD/Bundesamt f. Gewässerkunde, Koblenz
Plie	Hohenheim 1878-2004	Hohenheim 1878-2004		Inst. f. Physik Hohenheim/Inst. f. Physik Hohenheim
Reu1	Bad Urach 1975-2002	Reutlingen 1947-2002		DWD/DWD
Reu2	Bad Urach 1975-2002	Reutlingen 1947-2002		DWD/DWD
Reu3	Bad Urach 1975-2002	Reutlingen 1947-2002		DWD/DWD
Rie1	Ulm 1947-2002	Riedlingen 1951-2002/Ulm 1894-2002		DWD/DWD
Rie2	Ulm 1947-2002	Riedlingen 1951-2002/Ulm 1894-2002		DWD/DWD
Rust1	Freiburg 1950-2002/Karlsruhe 1799-2006	Rust 1951-1995/Karlsruhe 1833-2006	Plittersdorf 1889-2003	DWD/DWD/Bundesamt f. Gewässerk., Koblenz
Rust2	Freiburg 1950-2002/Karlsruhe 1799-2006	Rust 1951-1995/Karlsruhe 1833-2006	Plittersdorf 1889-2003	DWD/DWD/Bundesamt f. Gewässerk., Koblenz
Wer1	Würzburg 1804-2006/Wertheim 1961-2004	Würzburg 1877-2006	Würzburg 1890-2004	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt
Wer2	Würzburg 1804-2006/Wertheim 1961-2004	Würzburg 1877-2006	Würzburg 1890-2004	DWD/DWD/Bayr. Landesamt f. Umwelt

Tabelle 2-3 zeigt die verwendeten Klimastationen mit Beobachtungszeitraum. Die Daten der Stationen wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD), dem Bundesamt für Gewässerkunde Koblenz, dem Bayerischen Landesamt für Umwelt, der Wetterzentrale (http://Wetterzentrale.de) und vom Institut für Physik und Meteorologie der Universität Hohenheim zur Verfügung gestellt.

Von den in Abbildung 2-4 gezeigten Klimastationen (blaue Kreise) standen zumeist Tages- bzw. Monatswerte von maximaler, minimaler und mittlerer Lufttemperatur, Luftdruck, Sonnenscheindauer, Abfluss und des Wasserstandes sowie Tages-/Monatssummen des

Niederschlags zur Verfügung. Die Berechnung des arithmetischen Mittels und Summen aus Tagesdaten, erfolgte, wenn nötig, mit dem Tabellen-Kalkulationsprogramm OpenOffice (Oracle, 2000).

Für die Berechnungen der Klima-Wuchsbeziehungen der Frühholz-Variablen (=FH-Variablen; Parameter der bildanalytischen Messungen wie beispielsweise mittlere Frühholz-Gefäßfläche eines Jahres) wurde zusätzlich der „self-calibrating Palmer Drought Severity Index“ (scPDSI) von van der Schrier et al. (2006) herangezogen (Quelle: http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/drought/).

Der scPDSI der Grid-Boxes (0.5°x0.5°) für den Main (Grid-ref. 381280, Long. 10.2, Lat. 49.75), die Donau (Grid-ref. 382278, Long. 10.75, Lat. 48.75) und den Rhein (Grid-ref. 377278, Long. 8.25, Lat. 48.75) fanden Verwendung. Bei dem scPDSI handelt es sich um einen kalibrierten Trockenheits-Index, der aus interpolierten monatlichen Niederschlags- und Temperaturdaten berechnet wird. Wayne Palmer (Palmer, 1965) schlug den PDSI in den 1960igern zur effektiven Determination regionaler Langzeit-Trockenheit vor. Dabei bedeuten negative Werte wie z.B. -4 extreme Trockenheit und positive Werte wie z.B. +4 extreme Feuchte. Der PDSI gilt heute als „halb-offizieller“ Index und ist wahrscheinlich der verbreitetste Trockenheits-Index (Alley, 1984). Der PDSI findet beispielsweise Anwendung am „National Oceanic & Atmospheric Administration“ (NOAA; USA) zur Ausweisung von Trockengebieten. Mittels dem PDSI werden am NOAA Gebiete ausgewiesen, die heftige, häufig wiederkehrende und langanhaltende Trockenperioden aufweisen. Von Bedeutung ist dies z.B. für die dortige regionale Landwirtschaft und für die Waldbrandverhütung.

2.6.2 Wetteranomalien zur Identifizierung von holzanatomischen Veränderungen

Um Jahre mit extremen klimatischen Ereignissen zu identifizieren, wurden – neben oben erwähnten Tages- und Monatsdaten von Temperatur, Niederschlag, Abfluss und Wasserstand – Daten von Frost- bzw. Eistagen sowie Phänologiedaten herangezogen. Jahre mit extremen Ereignissen, wie z.B. Sommer-Hochwasser, und Wetteranomalien, wie beispielsweise extreme Sommertrockenheit oder Spät-Frost, wurden aus folgenden weiteren Quellen entnommen: Deutscher Wetterdienst (www.DWD.de), Wetterchroniken der Wetterzentrale (www.Wetterzentrale.de/Wetterchroniken), von Schmanck (www.Schmanck.de) und www.Wetterklimafakten.eu, Unbehauen (1971).

2.6.3 Klimadaten und Wetteraufzeichnungen für das Freiland-Experiment in den Jahren 2005 und 2006

Das Eichen-Experiment wurde im Botanischen Garten der Universität Hohenheim in einem voll-umzäunten „Drahtgewächshaus“ (Abb. 2-7) durchgeführt. Die Hohenheimer Klimastation (Institut für Physik und Meteorologie; Leitung: I. Henning-Müller) befindet sich in einer Entfernung von ca. 500-600 Meter. Damit standen kontinuierliche Klima- und Wetteraufzeichnungen (Tagesdaten der Lufttemperatur, des Niederschlags, der relativen Luftfeuchte, der Sonnenscheindauer sowie Monats- und Jahresberichte) zur Verfügung. Aus den Angaben Temperatur und relativer Luftfeuchte zum Zeitpunkt 13:00 Uhr wurde das tägliche Wasserdefizit der Luft am Standort berechnet.

Koordinaten der Wetterstation Hohenheim:
Geogr. Breite: 48° 43' N; Geogr. Länge: 09° 13' E; Höhe: 407 m ü.N.N.

Die Witterung von Herbst 2004 bis Oktober 2006:
Im Folgenden findet sich eine Übersicht aus den meteorologischen Monatsberichten des Instituts für Physik und Meteorologie der Universität Hohenheim von September 2004 bis Oktober 2006 (Henning-Müller, 2004-2006). Die Versuchseichen wurden ab Herbst 2004 in das Drahtgewächshaus eingebracht. Die Simulation verschiedener Umweltereignisse fanden dann im Jahr 2006 statt; daher soll an dieser Stelle eine Übersicht der Witterung innerhalb dieses Zeitraumes gegeben werden. Die Vergleiche bzw. Abweichungen des langjährigen Mittels von beispielsweise der Temperatur beziehen sich auf den Zeitraum zwischen 1961-90.

„Der **Winter (Dez, Jan, Feb) 2004/05** war um 0,2°C zu kalt. Es gab 5 Eistage mehr als erwartet. Durch den anfangs milden Januar blühten Hasel und Schwarzerle um drei Wochen verfrüht. Das **Frühjahr (Mrz, Apr, Mai) 2005** war milder, feuchter und verschneiter als erwartet. Am 01.03.05 wurden -17,3°C gemessen (absoluter Kälterekord für einen Frühjahrstag). Der **Sommer (Jun, Jul, Aug) 2005** lag im langjährigen Mittel in der Norm. Einem sehr warmen, trockenen Juni folgte ein mild-trüber Juli, der August war zu kalt. Der **Herbst (Sept, Okt, Nov) 2005** war ungewöhnlich warm (zweit-wärmster Herbst seit 1878). Der **Winter 2005/06** war in Hohenheim um 1,0°C zu kalt. Der Niederschlag wies nur 61% der Norm auf, und die Sonnenscheindauer erreichte 119% des langjährigen Mittels. Die tiefste Temperatur trat am 16.01.06 mit -11,7°C auf" (Henning-Müller, 2004-2006).

Klima und Witterung im Versuchsjahr 2006:
Das Klima und die Witterung im Versuchsjahr 2006 wird kurz und übersichtlich dargestellt. Informationen zum gesamten Jahr 2006, dem Frühjahr, dem Sommer und dem Herbst werden ausführlicher beschrieben, die Monate April bis Oktober in Tabellenform aufgeführt (Tab. 2-4). Die folgenden meteorologischen Daten sind Henning-Müller (2004-2006) entnommen.

Das **Jahr 2006** war in Hohenheim um 1,4°C wärmer als das langjährige Mittel (das 5.-wärmste Jahr zusammen mit 1989 und 1999 seit 1878), der Niederschlag erreichte 100% der Norm und die Sonnenscheindauer 111% des langjährigen Mittels. Abbildung 2-6 zeigt den Verlauf der Temperatur (Tagesmaximum), das Wasserdefizit und die Anzahl der Sonnenstunden über die Vegetationsperiode im Jahr 2006.

„Das **Frühjahr** war um 0,1°C zu mild, trüber (91%), niederschlagsreicher (136%) mit doppelt so vielen Tagen mit Schneedecke wie erwartet. Der März begann sehr kalt und verschneit, mit überdurchschnittlichem Niederschlag und wenig Sonne. Es folgte ein milder, verregneter und trüber April. Im Mai war es wechselhaft, insgesamt zu mild, verregnet und trüb. An zwei der sechs Gewittertagen gab es Hagel (27.3. und 13.5.). Die kühle Witterung im März und Anfang April führte zu einer Verspätung der Pflanzenentwicklung (um ca. 21 Tage). In der zweiten Maihälfte führte die Erwärmung zu einer Blütenexplosion.
Der **Sommer** bot einige Extreme: Er war um 1,9°C zu warm und belegt damit Platz 5 der Klimareihe, zusammen mit dem Sommer 1992. Es war um 12% sonniger, und, was den Gesamt-Niederschlag betraf, normal, jedoch ungleichmäßig auf die Monate verteilt. Es gab fast doppelt so viele Sommertage: 45 (statt 25,4), und sogar 14 statt 3,8 heiße Tage. Einem sehr warmen, sonnigen und trockenen Juni folgte ein Rekord-Juli: mit 5,1°C über dem langjährigen Mittel war er der wärmste Juli seit 1878, zugleich der dritt sonnigste, mit langer Trockenperiode und einigen kräftigen Niederschlägen. Der August hingegen war der zweit-trübste seit 1893, zu kalt (Abw.: -1,7°C) und durchweg verregnet. Die Anzahl der

Regentage im August betrug 25 und stellte somit einen Rekord (zusammen mit Aug. 1931) dar.

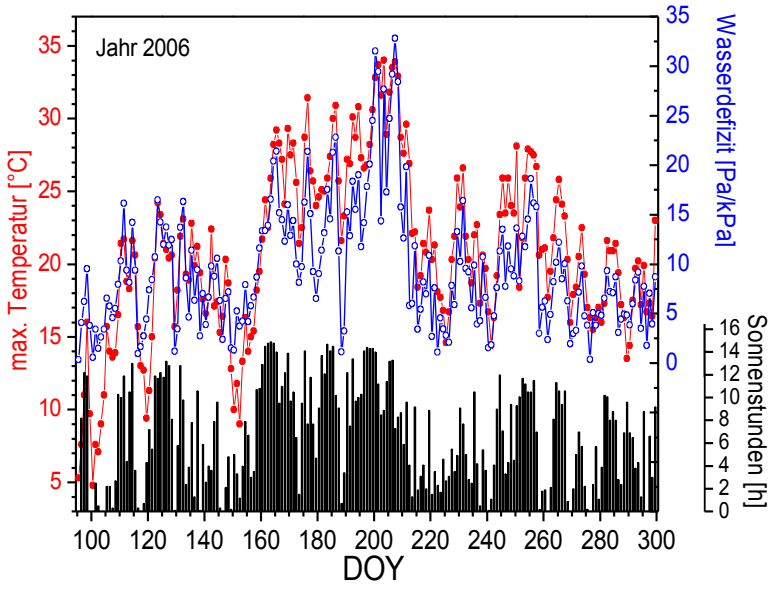


Abb. 2-6: Verlauf der Tagesmaximum-Temperatur (rot), Wasserdefizit (blau) am Standort und Anzahl der Sonnenstunden (schwarz) im Jahr 2006. Klimastation Universität Hohenheim (Institut für Physik und Meteorologie). - ●=Tages-maximum-Temperatur (°C); o=Wasserdefizit (Pa/kPa); l=Sonnenstunden (h); DOY=Tag im Jahr (Day of Year); DOY 100=10.Apr.; DOY 150=30.Mai; DOY 200=19.Juli; DOY 250=7.Sept.; DOY 300=27.Okt.

Der **Herbst** war der wärmste seit 1878 (Abw.: +3,4°C), bei durchschnittlichem Niederschlag. Es gab 2 statt 13,6 Frosttage, dagegen 9 statt 3,8 Sommertage. Der September 2006 war der wärmste seit 1878, mit viel Sonne, aber auch hohen Niederschlägen. Der zweit-mildeste November war sehr sonnig und ungewöhnlich trocken (mit 44% des üblichen Niederschlags)“ (Henning-Müller, 2004-2006).

Die meteorologischen Abweichungen der Lufttemperatur, der Niederschlagssumme und der Sonnenscheindauer des Jahres 2006 finden sich in nachfolgender Tabelle 2-4 (Henning-Müller, 2004-2006) zusammengefasst.

Tab. 2-4: Meteorologische Informationen zur Lufttemperatur, zum Niederschlag und zur Sonnenscheindauer der Monate April bis Oktober 2006 (Henning-Müller, 2004-2006). Fettgedruckte Werte=klimatische Ausreißer.

Monat	Abw. der Lufttemp. (°C)	Niederschlag (%)	Sonnenscheindauer %
April	+0,7	125	86
Mai	+1,3	130	97
Juni	+2,2	38	136
Juli	**+5,1**	100	**137**
August	+1,7	**173**	61
September	**+3,3**	111	117
Oktober	**+3,3**	161	115

Die Vegetationsperiode im Jahr 2006 war, mit durchweg positiven Abweichungen der Lufttemperatur von bis zu +5,1°C (wärmster Juli seit 1878) in den Monaten April bis Oktober, sehr warm.

Der Verlauf des berechneten Wasserdefizits am Standort zeigt hohe Übereinstimmung mit der täglichen Maximum-Temperatur. Ein besonders hohes Wasserdefizit wurde in der Zeit vom 8. Juni bis 30. Juli (DOY=159-211) erreicht. Auch in den Wochen danach stieg das Wasserdefizit zeitweise sehr stark an.

2.7 Alterstrend (Juveniltrend)

Bäume unterliegen einem natürlichen Alterstrend (Juveniltrend). Untersuchungen haben gezeigt, dass der Alterstrend je nach Standortbedingung, Bestandesstruktur, -geschichte, Klima- und Lichtverhältnis einen charakteristischen Verlauf ausbildet (z.B. Rieth, 1975; Bräker, 1981; Laible, 1987; Land, 2003). Dieser reicht von extrem ausgeprägten – bei solitär stehenden Eichen (Land, 2003) - über sehr gut ausgeprägte - bei Bäumen mit guten Standortbedingungen (Rieth, 1975; Laible, 1987; Land, 2003) - bis zu völlig unterdrückten Alterstrends auf Wuchsstockungsflächen oder Trockenstandorten (Rieth, 1975; Becker und Benckiser, 1976; Land, 2003). Die Alterstrendanalysen beinhalten ein großes Potenzial für die Rekonstruktion von Standortbedingungen/Bestandesstruktur der Auwälder vergangener Zeiten, die anhand subfossiler Bäume erstellt werden können (Spurk et al., 2002).

Um zu einer repräsentativen mittleren Alterstrendkurve für die Gesamtringbreite eines Standortes zu kommen, musste zuerst (bei den Holzproben, die kein Mark aufwiesen) eine Abschätzung der Entfernung zum Mark vorgenommen werden (Extrapolation der Ringanzahl unter zu Hilfenahme einer Kreisscheibe). Da der Alterstrendverlauf von Gesamtring und Spätholz nur marginale Unterschiede aufweist (Land, 2003), wurde der Alterstrend ausschließlich für die Gesamtringbreite erstellt. Die Standorts-Einzelkurven wurden in TSAP (Jahrringmess-Programm; Rinn, 1989-1996) mittels optimalem Trend in einem 5-jährigen gleitenden Zeitfenster geglättet, am maximalen Zuwachs übereinander gelegt und gemittelt (der Abstand zum Mark wurde dabei in Betracht gezogen). Die so erstellten Alterstrendmittelkurven der Standorte wurden am Maximalpunkt abgeschnitten und die Vorjahre verworfen; anschließend wurde eine exponentielle Regressionskurve erstellt, die den jeweiligen Alterstrendverlauf beschreibt (für detaillierte Erläuterungen zum Juveniltrend von süddeutschen Eichen siehe Land (2003).

2.8 Statistische Verfahren

2.8.1 Trendbereinigung, Indexierung und Chronologiebildung (Standardisierung) der Jahrring- bzw. Klimaparameter

2.8.1.1 Standardisierung der Zeitreihen von Gesamtring-, Spätholz-, Frühholzbreite und holzanatomischen Variablen und Chronologiebildung

Der Alterstrend (Juveniltrend) der Bäume enthält wichtige Informationen über Standortbedingungen und Bestandesstrukturen (z.B. Land, 2003; Haneca et al., 2005), allerdings muss dieser endogene Faktor zur Berechnung von Klima-Wuchsbeziehungen eliminiert werden. Durch eine Indexierung werden die Zeitreihen (Baummittelkurven) der Jahrringparameter trendbereinigt und normalverteilt (Schönwiese, 1985). Die Trendbereinigung kann durch verschiedene Verfahren erreicht werden (z.B. Verwendung eines „cubic smoothing spline“). Da in dieser Arbeit eine Reihe unterschiedlicher Zeitreihen erstellt wurden, wurde die verwendete Methode zur Trendbereinigung je nach Zeitreihe individuell angewandt; je nach Verlauf der Zeitreihe konnten so hoch-, mittel- und niederfrequente Signale beibehalten oder entfernt werden.

Für die Berechnungen von statistischen Jahrringparametern (wie z.B. Autokorrelation, mittlere Gleichläufigkeit oder Tendenzwechsel) von Gesamtring(RW), Spätholz(SH) und Frühholz(FH) wurden die jeweiligen Zeitreihen (Baummittelkurven) in TSAP (Rinn, 1989-1996) mittels der Funktion „optimaler Trend“ mit einem gleitenden Zeitfenster von 11 Jahren trendbereinigt und Residuen-Kurven berechnet. Die Chronologiebildung (Standortschronologie) erfolgte durch arithmetische Mittelung aller Einzelkurven.

Die Chronologiebildung für die Jahrringparameter von Gesamtring(RW), Spätholz(SH) und Frühholz(FH) zur Berechnung von Klima-Wuchsbeziehungen erfolgte mit einem anderen Verfahren. Die jeweiligen Zeitreihen (Baummittelkurven) mittels einem „cubic smoothing spline“ mit der Länge von 31 Jahren trendbereinigt, die Autokorrelation mittels eines autoregressiven Modells herausgerechnet und anschließend eine Standortschronologie erstellt („biweight robust mean“) (Cook, 1985).

Die Trendbereinigung der jeweiligen Zeitreihen (Baummittelkurven) der Frühholz-Variablen (z.B. mittlere Querschnittsfläche der Frühholz-Tracheen eines Jahres; MVA) erfolgte mittels Regressionsgeraden, anschließender Berechnung von Residuen-Kurven und arithmetischer Mittelung (Standortschronologie), um hoch- und niederfrequente Trendverläufe zu erhalten.

2.8.1.2 Indexierung der Klimaparameter

Für die Berechnungen der Klima-Wuchsbeziehungen wurden Monatsmittelwerte (Temperatur, Abfluss, Wasserstand) bzw. Monatssummen (Niederschlag) verwendet.
Die Indexierung der Klimazeitreihen erfolgte durch die Berechnung des arithmetischen Mittelwerts aller Einzelmonate über den Gesamtzeitraum. Für die Temperatur wurde anschließend die jahrweise absolute Abweichung der Einzelmonate vom Gesamtzeitraum berechnet:

$$abs.\ Abweichung = x_i - \bar{x}$$

mit x_i: Monatsmittel im Jahr i
$\bar{x}$: Mittelwert über Gesamtzeitraum

Für den Niederschlag, den Abfluss und den Wasserstand wurde die jahrweise relative Abweichung in Prozent berechnet:

$$rel.\ Abweichung = \frac{x_i \times 100}{\bar{x}} - 100$$

mit x_i: Monatsmittel im Jahr i
$\bar{x}$: Mittelwert über Gesamtzeitraum

2.8.2 Korrelationsberechnungen zwischen den Jahrringchronologien und den Klimaparametern (Klima-Wuchsbeziehungen)

Der Korrelationskoeffizient (r) ist ein Ausdruck für den statistischen Zusammenhang zweier Zeitreihen. Der Wert des Korrelationskoeffizienten kann zwischen -1 und +1 schwanken, wobei -1 einen vollkommen gegensinnigen Zusammenhang und +1 einen vollkommen gleichsinnigen Zusammenhang bedeutet.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

mit x_i: Ringbreite im Jahr i der ersten Zeitreihe
$\bar{x}$: Mittlere Ringbreite der ersten Jahrringkurve
y_i: Ringbreite im Jahr i der zweiten Zeitreihe
$\bar{y}$: Mittlere Ringbreite der zweiten Jahrringkurve

Die Jahrringkurven müssen zuvor alterstrend-bereinigt und annähernd normalverteilt sein, was durch die Standardisierung erreicht wurde (Schönwiese, 1985).
Die Korrelationsberechnungen der Klima-Wuchsbeziehungen erfolgten in 'DendroClim' (Biondi und Waikul, 2004).

2.8.3 Statistische Jahrringparameter der Standortschronologien

Die statistischen Jahrringparameter sind teils in TSAP (Rinn, 1989-1996), in Arstan (Cook, 1985) bzw. in einem Tabellenkalkulationsprogramm (Oracle, 2000) berechnet worden. Eine Tabelle hierzu befindet sich im Anhang auf 228.

Mittlere Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite (MRW, MLW, MEW) der Standortschronologien:
Die mittlere Gesamtring(MRW)-, Spätholz(MSH)- und Frühholz(MFH)breite berechnet sich nach der folgenden Formel:

$$MRW\,;MSH\,;MFH = \frac{\sum_{i-1}^{n} x_i}{n}$$

mit n: Ringanzahl
x_i: Ringbreite im Jahr i

Diese wurden anhand von Rohdaten (Baummittelkurven) über den Gesamtzeitraum für die einzelnen Standorte berechnet.

Mittleres Alter der rezenten Eichen-Bestände:
Das Mittlere Bestandsalter errechnet sich durch arithmetische Mittelung aus dem Alter aller Bäume eines Standortes.

Da das Alter der Bäume innerhalb eines Standortes sehr homogen war, liefert das mittlere Bestandsalter wichtige Informationen darüber, in welcher Altersphase sich die Bäume eines Bestandes befinden und ob sie mit anderen Standorten ohne weiteres vergleichbar sind.

Belegung der Standortschronologien:
Die Belegung bzw. Belegungsdichte ist die Anzahl der vermessenen Bäume bzw. Einzelkurven in einem Jahr, durch die die entsprechende Standortschronologie repräsentiert wird. Da die Anzahl der Einzelkurven, die für eine repräsentative Chronologie benötigt wird, von Standort zu Standort stark schwanken kann, wurde die Belegung der Chronologien mittels EPS (Kapitel 2.8.3) auf Repräsentanz überprüft.

Fernkorrelation zwischen den rezenten Standortschronologien:
Die Fernkorrelation ist ein Maß für die Ähnlichkeit zweier entfernt gelegener Standortschronologien zueinander. Hierzu wurden die Rohwerte (in mm/100) der Jahrringkurven von RW, SH und FH in TSAP (Rinn, 1989-1996) verglichen (zur Berechnung des t-Tests nach Hollstein sei auf Rinn, 1989-1996 verwiesen). Im nächsten Schritt erfolgte eine Distanzmessung zwischen allen Standorten (in km) anhand von geographischem Kartenmaterial (Luftlinie in km).

Die Fernkorrelation zwischen den Standortschronologien von RW-, SH- und FH wurden über den maximalen Gesamtzeitraum berechnet. Für die Fernkorrelation der SH-Chronologien wurde zusätzlich eine zweite Variante gewählt. Die SH-Chronologien wurden deutlich nach Abklingen des Alterstrends abgeschnitten und erneut einer Fernkorrelation unterzogen (siehe oben). Somit ging nur die adulte Phase in die Berechnung ein. Bestände mit Bäumen, bei denen keine eindeutige Altersphase zu erkennen war, wurden nicht in die Berechnung aufgenommen.

Anhand der t-Werte unterschiedlich weit entfernter Standorte können Rückschlüsse gezogen werden, in wie weit klein-, regional- oder großklimatische Einflüsse das Jahrringwachstum bestimmt haben. Liegen zwei Standorte z.B. relativ weit auseinander aber innerhalb des gleichen Flusssystems bzw. Flusstals, so sollte man trotz der Entfernung eine recht hohe Synchronisation der Jahrringkurven erwarten können.

Mittlere Sensitivität (Mean Sensitivity=MS) der Standortschronologien:
Die Bewegtheit einer Jahrringkurve kommt in der „Mean Sensitivity“ zum Ausdruck (Douglass, 1936). Hohe Werte zeigen große interannuelle Schwankungen an („sensitiv“),

geringe Werte dagegen Gleichförmigkeit („complacent“). Die „Mean Sensitivity“ ist einer der aussagekräftigsten Jahrringparameter in Bezug auf die klimatische Sensitivität einer Jahrringkurve (Fürst, 1963; Land, 2003). Die Grenzen der Mean Sensitivity liegen zwischen 0% und 200%.

$$MS = \frac{\sum_{i-1}^{n-1} |x_i - x_{(i+1)}|}{\sum_{i=1}^{n} x_i} \times \frac{n}{n-1} \times 100$$

mit n: Ringanzahl
x_i: Ringbreitenindex im Jahr i

Die mittlere Mean Sensitivity für RW-, SH- und FH-Chronologien wurde in TSAP (Rinn, 1989-1996) berechnet.

Mittlere Gleichläufigkeit (GLK) der Standortschronologien:
Die Mittlere Gleichläufigkeit ist ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Jahrringkurven zueinander. Hierbei sind nicht die absoluten Jahrringbreitenwerte von Bedeutung, sondern die Zu- oder Abnahme beider Zeitreihen im Vergleich zum Vorjahr (Huber, 1952), d.h. die Vorzeichen der Änderung von Jahr zu Jahr. Die mittlere Gleichläufigkeit für RW-, SH- und FH-Chronologien wurde in TSAP (Rinn, 1989-1996) berechnet.

Autokorrelation (AK) der Standortschronologien:
Der jährliche radiale Zuwachs unterliegt nicht ausschließlich dem Einfluss des aktuellen Jahres, sondern wird ebenso durch die Wuchsbedingungen der Vorjahre beeinflusst (Fritts, 1976; Land, 2003). Wie groß der Einfluss der Vorjahre ist, kann mit der Autokorrelation abgeschätzt werden. Dies geschieht mit der seriellen Korrelation zwischen einer Jahrringkurve, die um ein Jahr gegeneinander (Vorjahr kommt auf Folgejahr zu liegen) verschoben wird. Je größer der Korrelationskoeffizient (r), umso größer ist der Einfluss des Vorjahres zu bewerten.

Die Autokorrelation für RW-, SH- und FH-Chronologien wurde in TSAP (Rinn, 1989-1996) berechnet.

Tendenzwechsel (Tendency Change=TC) der Standortschronologien:
Die absoluten Zuwachswerte bleiben unberücksichtigt. Der Tendenzwechsel gibt an, wie häufig es zu wechselnden Schwankungen im Zuwachs (breiter oder schmaler als im Vorjahr) innerhalb einer Jahrringkurve kommt, und gibt damit ein Bild über die Klimasensitivität der Bäume eines Standortes bzw. einer Chronologie.

t-Wert der Standortschronologien:
Der t-Wert ist ein Maß für die Ähnlichkeit zweier Jahrringkurven. Im Unterschied zu den Gleichläufigkeiten bezieht sich der t-Wert auf die absoluten Jahrringbreiten-Werte. Rohwertkurven von RW, SH und FH beinhalten neben hochfrequenten (interannuellen) auch mittel- bzw. niederfrequente Schwankungen, wie z.B. den Alterstrend (Rieth, 1975; Bräker, 1981; Land, 2003). Um diese vor der Berechnung der Korrelationskoeffizienten zu eliminieren, wenden Baillie und Pilcher (1973) folgendes Verfahren an:

$$r = \sum (x_i - \bar{x}) \frac{(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

mit x_i: Ringbreite im Jahr i der ersten Zeitreihe
$\bar{x}$: Mittlere Ringbreite der ersten Jahrringkurve
y: Ringbreite im Jahr i der zweiten Zeitreihe
x_i: Mittlere Ringbreite der zweiten Jahrringkurve

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}}$$

mit r: Korrelationskoeffizient
n: Ringanzahl

Der t-Wert nach Hollstein (zur Berechnung sei auf Rinn, 1989-1996 verwiesen) wird im Wesentlichen nach dem gleichen Schema berechnet. Die Trendeliminierung erfolgt jedoch nicht mit einem gleitenden Mittel, sondern wird die Differenz gebildet aus der Ringbreite und der Ringbreite des Vorjahres. Dies bietet bei sehr kurzen oder stark schwankenden Jahrringkurven eine korrektere Trendbereinigung.
Da in diese Arbeit Bestände eingingen, die in sich zwar recht homogen sind, sich aber untereinander in Alter, Jahrringbreiten und Standorteigenschaften sehr stark unterschieden, wurde mit dem t-Wert nach Hollstein gearbeitet.

Der t-Wert ist eine streng positive Größe. t-Werte über 5 bezeichnen hoch wahrscheinliche Synchronlagen.

Güte der Standortschronologien:
Unter Weiserjahren (Signaturen) versteht man das Auftreten von gleichsinnigen Zuwachsänderung (positiv oder negativ) von Jahrringkurven an einem Standort. Der Anteil der Weiserjahre (Signaturen) an den Gesamtjahren einer Standortschronologie ist als Güte definiert und wird in Prozent angegeben. Die Güte lässt Rückschlüsse auf die Abhängigkeit des Jahrringwachstums auf verschiedene Klima-, Umwelt- und Standortfaktoren zu.

Die Güte von RW-, SH- und FH-Standortschronologien wurde in TSAP (Rinn, 1989-1996) berechnet.

Expressed Population Signal (EPS) der Standortschronologien:
Das Expressed Population Signal (EPS) gibt an, ob die verwendeten Zeitreihen (Stichprobe) (Kap. 2.8.3) als repräsentativ für die Grundgesamtheit anzusehen sind (Briffa und Jones, 1990; Haneca et al., 2006). Zusätzlich erhält man eine Aussage über die Qualität der Standortschronologie. Das EPS wird aus der Korrelation aller Baummittelkurven eines Bestandes, aus denen sich die Chronologie zusammensetzt, berechnet.

$$EPS(n) = \frac{n \bar{r}_{bt}}{n \bar{r}_{bt} + (1 - \bar{r}_{bt})}$$

mit n: Anzahl der korrelierten Bäume
$\bar{r}_{bt}$: Korrelation zwischen allen Jahrringmittelkurven

Die EPS-Werte liegen zwischen 0 und 1. Wigley et al. (1984) und Haneca et al. (2006) bezeichnen eine Standortschronologie als repräsentativ, wenn das EPS einen Wert von 0,85 übersteigt. Die Berechnung von EPS erfolgte an trendbereinigten RW-, SH-, FH-Chronologien und holzanatomischen Variablen in Arstan (Cook, 1985).
Das EPS wurde in einem 10-jährigen Zeitfenster mit 5-jähriger Überlappung berechnet. Die Wahl des relativ kurzen Zeitfensters ist damit zu begründen, dass (i) Bestände unterschiedlicher Altersphasen eingingen und (ii) kurzfristige Änderungen des EPS erkennbar sind.

2.8.4 Berechnung der Klima-Wuchsbeziehungen

Die Berechnung der Zusammenhänge zwischen den trendbereinigten Standortschronologien (Kapitel 2.8.1.1) und den indexierten Klimaparametern (Kapitel 2.8.1.2) erfolgte mit der Software 'DendroClim' (Biondi und Waikul, 2004).

Im ersten Schritt erfolgten die Korrelationsberechnungen über die längst möglichen Gesamtzeiträume zwischen Standortschronologien und Klimaparametern. Diese waren entweder limitiert durch kürzere Klimazeitreihen als Chronologiezeitreihen oder umgekehrt.

Im zweiten Schritt erfolgten Berechnungen mittels eines gleitenden Zeitfensters von 30 Jahren. Dies bietet eine äußerst informationsreiche Übersicht darüber, wie sich die Zusammenhänge zwischen Klima und Zuwachs über die Zeit verhalten. Es können Phasen geringer, keiner oder sehr starker Klima-Wuchsbeziehungen erkannt werden.

Gegen Ende der Vegetationsperiode verändert sich in Bäumen das Stoffwechselgeschehen, z.B. finden Reservestoffspeicherung und die Ausbildung der Frosthärte statt. Damit diese Prozesse, die teilweise vom Klima des Vorjahres abhängen und somit das Jahrringwachstum des Folgejahres direkt beeinflussen können, wurden die Klima-Wuchsbeziehungen von August des Vorjahres (Monate des Vorjahres sind mit Großbuchstaben versehen, z.B. AUG) bis einschließlich Oktober (Monate des aktuellen Jahres sind mit einem Großbuchstaben versehen, z.B. Okt) des aktuellen Jahres berechnet.

Im Regelfall standen zur Berechnung in 'DendroClim' (Biondi und Waikul, 2004) langjährige Zeitreihen von Temperatur, Niederschlag bzw. Abfluss und Wasserstand aus (un-)mittelbarer Nähe der Standorte zur Verfügung. Bei Klimazeitreihen, die kürzer als 50 Jahre sind wurden zusätzlich Berechnungen mit Klimazeitreihen durchgeführt, die von einer weiteren Klimastation in naher Umgebung stammen und länger sind. Dies ließ zum Einen einen Vergleich zwischen Klimastationen unterschiedlicher Entfernungen zu, und zum Anderen konnte damit meist eine Berechnung über die Gesamtlänge der Standortschronologie erreicht werden.

2.8.5 Weiser- und Ereignisjahranalyse

Die Ereignis- und Weiserjahranalyse wurde mit der Software 'Weiser' (García-González, 2001) an Rohwertkurven von RW, SH und FH durchgeführt (Mindestbelegung 4 Bäume). Das Programm 'Weiser' legt die Ereignisjahr- und Weiserjahr-Definition von Schweingruber et al. (1990) zu Grunde.

Als Weiserjahr gelten Jahre, die innerhalb einem gleitenden 7-jährigen Zeitfenster den mittleren Zuwachs um 50, 100 oder 150% übersteigt (positiv) oder unterschreitet (negativ). Die Weiserjahranalyse wurde für jeden Einzelbaum durchgeführt.

Als Ereignisjahre gelten die Jahre, in denen mindestens 75% der Bäume eines Standortes die gleiche positive oder negative Tendenz aufweisen. Es wurden demnach positive und negative Ereignisjahre unterschieden.

2.9 Beschreibung, Dokumentation und Datierung holzanatomischer Anomalien

2.9.1 Holzanatomische Anomalien in rezenten Eichen

Die Beschreibung und Dokumentation holzanatomischer Anomalien in Eichen aus Standorten in Süddeutschland (Abb. 2-4; im Folgenden als „Rezentstudie“ bezeichnet) und an jungen getopften Eichen (Abb. 2-7; im Folgenden als „Versuchseichen“ bezeichnet) erfolgte am Stammquerschnitt. Die Proben wurden dazu unter einem Auflicht-Binokular (Stemi 2000 CS, Carl Zeiss) bei fünf- bis fünfzig-facher Vergrößerung untersucht.

Um sich anschließend ein genaueres Bild der Anomalien im Querschnitt machen zu können, wurden wie folgt verfahren:

- Aufkleben (Sekundenkleber) der Holzproben (ca. 1cm x 1cm) auf einen Holzträger
- Stark ausgetrocknete Proben wurden vor dem Schneiden 60 Minuten lang bei 125°C in einem Dampfdrucktopf „weich“ gekocht.
- Erstellen der Dünnschnitte (Dicke: 20µm) an einem Schlitten-Mikrotom von Leitz Wetzlar mit einem C-Messer (Winkel: 3°) und einem Schnittwinkel von 45° (Messer - Probe)
- Färben der Dünnschnitte mit Etzold (10 min.)
- Waschen der gefärbten Dünnschnitte in bidest. Wasser (5 min.)
- Fixierung der gefärbten Dünnschnitte auf einem Objektträger in Kaiser Glycerin-gelatine von 'Merck'

Die Beschreibung und Dokumentation der angefertigten Dünnschnitte erfolgte an einem Durchlicht-Mikroskop Standard 14 von 'Carl Zeiss'.

Mit einer digitalen Kamera (Canon Powershot A95, 5 Megapixel), die mit einer Adapteroptik auf einem Durchlicht- (Standard 14, Carl Zeiss) bzw. auf einem Auflicht-Binokular (Stemi 2000 CS) befestigt war, konnten digitale Photographien der Dünnschnitte angefertigt werden. Um unscharfe Teile im Bild vollends auszuschließen, erfolgte die Bildnahme ebenenweise. Die Bilder der einzelnen Ebenen wurden dann unter Verwendung von Helicon Focus (Version 3.20.4 Free Release; http://helicon.com.ua) zusammengefügt und, wenn nötig, mit einer Tonwertkorrektur in Adobe® Photoshop® bearbeitet.

2.9.2 Datierung holzanatomischer Anomalien

Die exakten Datierungen der Jahre, in denen holzanatomische Veränderungen in rezenten Eichen auftraten, erfolgte anhand der zuvor auf Synchronlage überprüften Einzelradien, die anhand des Beprobungsjahres exakt rückdatiert werden konnten.

Als Jahre mit holzanatomischen Anomalien galten Jahre, in denen mindestens in einer der zwei Baumproben (Radius A oder B) eine *deutliche* Anomalie zu erkennen war. Undeutlich ausgebildete Anomalien wurden nicht gewertet. Beim Auftreten zweier unterschiedlicher Anomalien im selben Jahr und Baum wurden beide als gleichwertig notiert, z.B. Dichteband nach dem Frühholz (auf Radius A) und Dichteband im Spätholz (auf Radius B). Kombinationen traten sehr selten auf; damit war das Einführen von Bezeichnungen für Merkmalskombinationen nicht nötig.

2.10 Verifizierung holzanatomischer Anomalien im Freiland-Experiment

Um die holzanatomischen Anomalien, die in den Eichen der Rezentstudie und im subfossilen Eichen-Material dokumentiert wurden, zu verifizieren, fanden im Rahmen dieser Arbeit Experimente an Versuchseichen statt. Die Experimente wurden im Botanischen Garten der Universität Hohenheim durchgeführt (siehe unten). Diese sollten weitere Beweise dafür liefern, durch welche biotischen und abiotischen Faktoren holzanatomische Veränderungen entstehen. Experimentell wurden Fröste, Trockenperioden, Insektenkalamitäten und Hochwasser simuliert. Die Experimente wurden von ökophysiologischen Messungen (Dendrometer) begleitet.

2.10.1 Kriterien des Freiland-Experiments und der Versuchseichen

60 Versuchseichen (*Quercus robur* L.) wurden im November 2004 von der Baumschule Leibssle in Reutlingen/Betzingen erworben und in Pflanzenbehälter mit einem Durchmesser von 30 cm und einer Tiefe von 30 cm eingetopft. Wurzeln und Kronen der jungen Eichen wurden beschnitten, um ein schnelles Einwachsen zu garantieren. Bei der Auswahl des Pflanzenmaterials wurde besonderes Augenmerk auf Homogenität von Alter und Größe gelegt. Alle Bäumchen (im Folgenden als „Versuchseichen“ bezeichnet) hatten ein Alter von 5 Jahren und eine Größe zwischen 180 und 220 cm. Die Versuchseichen wurden samt Topf im Boden eines Drahtgewächshauses versenkt und mit Mulch abgedeckt (Abb. 2-7).

Im November 2005 wurden weitere 20 Versuchseichen (*Quercus robur* L.) aus der selben Baumschule beschafft und ohne Wurzel- und Kronenbeschnitt eingetopft. Die weitere Verfahrensweise war identisch zur obigen.

Die 60 (im November 2004 gekauften) und die 20 (im November 2005 gekauften) Eichen wurden in nährstoffreiche Erde eingebracht.

Alle Versuchseichen befanden sich ab November 2004 bzw. 2005 in einem Drahtgewächshaus (Abb. 2-7), das rings herum durch Maschendrahtzaun abgeschirmt ist. Dies schloss Beeinträchtigungen und Störungen durch z.B. Vögel oder Menschen aus. Das Drahtgewächshaus ist mit 5-10° Neigung nach Süden ausgerichtet. Der Abstand der Versuchseichen zueinander betrug ca. 50 bis 80 cm (Stamm-Stamm-Abstand). Die Eichen waren in drei Reihen stufenartig hintereinander angeordnet um Beschattungen weitestgehend auszuschließen.



Abb. 2-7: Drahtgewächshaus mit Versuchseichen am 31. Mai 2006. Die getopften Eichen wurden in den Boden versenkt und mit Mulch abgedeckt. Die 200 Liter Tonnen dienten der Simulation von Hochwasser.

Drainage-Schichten verhinderten Staunässe durch Gieß- oder Regenwasser. Schutzmaßnahmen, wie z.B. gegen evtl. auftretende Fröste, Hitzeperioden oder Mehltaubefall wurden nicht vorgenommen. Ein aufgetretener (leichter) Blattlaus-Befall wurde durch einmalige Anwendung von 'Spruzit® Schädlingsfrei' (empfohlene Dosierung) Mitte Mai 2006 behandelt.

Eine ausreichende Bewässerung der Versuchseichen während der ersten Vegetationsperiode fand ein bis zwei mal pro Woche statt (5-10 Liter je Bewässerung). Gedüngt wurde am 07. und 30.Mai 2006 mit handelsüblicher organisch-mineralischer NPK-Düngerlösung (8-8-8; inkl. Spurenelemente) und am 08.Juni 2006 mit Langzeitdünger (Fluranit®). Die Eichen der Hochwasser-Versuche erhielten erst nach Beendigung des jeweiligen Experiments den Langzeitdünger Fluranit®. Aufgrund der Überflutung des gesamten Pflanzenbehälters hätte dies evtl. zu einer sofortigen Auflösung des Fluranit® geführt und damit eine starke Überdüngung zur Folge gehabt (mündliche Absprache mit Gärtnermeister Ingo Hans); ein Absterben der Feinwurzeln und evtl. der Versuchseichen hätte die Folge sein können.

Die Versuchsdurchführungen fanden ausschließlich im Jahr 2006 statt! Von den insgesamt 80 Versuchseichen konnten im Versuchsjahr 2006 insgesamt 64 Eichen für die verschiedenen Experimente verwendet werden. 16 Eichen starben in der ersten Vegetationsperiode ab oder trieben im Frühjahr 2006 nicht aus.

2.10.2 Messungen der diametralen Stammzuwachsänderungen mittels Dendrometer

Zur Messung der diametralen Dickenänderung wurde ein Verfahren nach Loris (1995) verwendet. Hierzu wurden 14 Dendrometer (Typ MM10 von Megatron, München) an je einer Versuchseiche angebracht. Tab. 2-5 gibt die Anzahl an Dendrometern je Versuchstyp wieder.

Tab. 2-5: Anzahl an Dendrometern je Versuchstyp

Versuchstyp	Anzahl Dendrometer
Defoliation	**2**
Frost	**2**
Hochwasser	**5**
Kontrolle	**1**
Trockenstress	**4**

Um eine möglichst durchgängige Messung der diametralen Dickenänderung zu erreichen, wurden die Dendrometer gleichmäßig auf die unterschiedlichen Versuchstypen (Hochwasser, Frost etc.) verteilt. Die Messungen liefen kontinuierlich vom 25.03.2005 (5 Dendrometer) bzw. 04.04.2006 (9 Dendrometer) bis zum 21.11.2006. Es wurde eine Befestigungshöhe zwischen 20 cm und 115 cm gewählt, da z.B. bei den Hochwasser-Versuchen darauf geachtet werden musste, dass die Dendrometer über dem Wasserspiegel in einem ungestörten Stammbereich angebracht waren.

Die Befestigung der Dendrometer am Stamm erfolge mit Lac Balsam® (Celaflor®) zwischen der Dendrometer-Halterung und dem Stamm (Abb. 2-8). Dies ermöglichte eine starre Arretierung der Dendrometer. Die Messungen erfolgten zu jeder vollen Stunde (Sommerzeit). Auf die Entfernung der Borke wurde verzichtet, da sie bei jungen Bäumen nur schwach ausgeprägt ist und damit nur eine geringe Fehlerquelle darstellt; die Gefahr das Kambium zu verletzen wäre zu groß gewesen.



Abb. 2-8: Messung zur diametralen Dickenänderung am Stamm einer Versuchseiche mittels Dendrometer. Deutlich ist der bewegliche Stempel (Pfeil) zu erkennen, welcher einen elektrischen Schiebe-Widerstand bewegt. Die Befestigung erfolgte durch Lac Balsam® in Stammhöhen zwischen 20 cm und 115 cm.

Zur Methodik der Messung mittels Dendrometern sei auf Loris (1995) verwiesen. Die Eichung der Dendrometer erfolgte nachträglich mittels einer Schieblehre. Über eine Distanz von 12 mm (entspricht der Wegstrecke des Schiebe-Widerstands) wurde in Millimeter-Schritten ein Messwert entnommen (mV) und anschließend über ein lineares Regressionsmodell die mV-Werte in Mikrometer (µm) umgerechnet.

Die stündlich gemessenen Dendrometer-Werte wurden zu Tages-Maximum-, -Minimum und -Mittelwerten verrechnet. Die Tagesspanne (24 Std.) wurde von 9 Uhr bis 8 Uhr des nächsten Tages definiert. Die Zeitskala (Datum) wird im folgenden als Julianische Zeit (Tag im Jahr, DOY) beginnend am 01.01.2006 bzw. als Tag seit Knospenbruch (DSB) angegeben. Z.B. entspricht die Zeit (Datum) 95,5 Julianischer Zeit dem 05. April 2006 um 12 Uhr mittags.

Die Dendrometer-Kurven beschreiben neben stündlichen Dickenänderungen des Stammes den diametralen Zuwachs der Versuchseichen über die Zeit und somit das Jahrringwachstum während der Vegetationsperiode. Die Differenz zwischen dem Minimum- und dem Maximumwert der Dendrometer-Kurve beschreibt den theoretisch möglichen Zuwachs und lässt Rückschlüsse auf Zuwachsstagnationen bzw. -schüben erkennen.
Es war zu erwarten, dass der radiale bzw. diametrale Zuwachs der Versuchseichen im besonderen Maße von den durchgeführten Versuchen abhängig sein würde. Die Dendrometer-Messungen sollten in dieser Arbeit Aufschluss darüber geben, zu welchem Zeitpunkt und in welchem Maße ein radialer bzw. diametraler Zuwachs stattgefunden hatte.

2.10.3 Dokumentation der Freiland-Experimente und Probenentnahme

Im Versuchsjahr 2006 wurden Veränderungen des Kronenzustandes und -zuwachses (Messung von drei Ästen je Baum in wöchentlichem Abstand), der Blattzustände (Chlorosen, Verfärbungen) und die allgemeinen Habitus-Zustände der Versuchseichen dokumentiert. Die Dokumentation geschah mittels digitalen Bildern und zuvor gefertigten Formblätter, in die alle Aktionen und Informationen für jeden Baum niedergeschrieben wurden.

Probenentnahme ('Ernte') aller 64 Versuchseichen fand am Ende der Vegetationsperiode im November 2006 statt. Die Blätter der Versuchseichen waren zu diesem Zeitpunkt vollkommen braun verfärbt und teilweise abgeworfen. Das radiale Dickenwachstum war eingestellt, wie sich aus den Dendrometer-Daten entnehmen ließ. Nacheinander wurden die Bäume aus ihren Töpfen entnommen, die Erde vorsichtig von den Wurzeln entfernt, der Zustand von Habitus und Wurzeln dokumentiert, die Baumhöhe vermessen und, wenn vorhanden, die Ansatzstelle der Dendrometer mit einem Maßband gemessen (Höhe am Stamm in cm).

Zur Auswertung der Versuche wurden von allen Versuchseichen je eine Stammscheibe aus einer Höhe von 20 cm bis 120 cm alle 20 cm entnommen. Von den Dendrometer-Bäumen wurden der jeweiligen Ansatzstelle des Dendrometers eine weitere Stammprobe entnommen.

Zur Auswertung der Holzanatomie und der Ringbreiten-Messungen standen somit mindestens 6 Stammquerschnitte je Baum aus verschiedenen Stammhöhen zur Verfügung. Jede Scheibe wurde in gleichgroße Viertel eingeteilt, vier Radien je Stamm-höhe vermessen und die Holzanatomie in den jeweiligen Vierteln aufgenommen (Abb. 2-9).

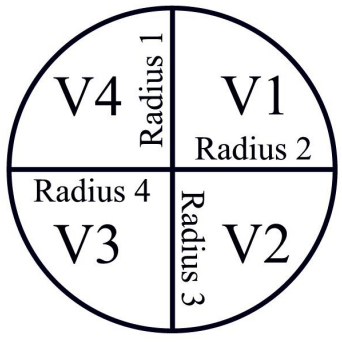


Abb. 2-9: Einteilung des Stammquerschnittes der Versuchseichen. - V=Viertel.

2.10.4 Art und Umfang der simulierten Umweltereignisse im Freiland-Experiment

Die durchgeführten Experimente (simulierte Umwelteinflüsse siehe unten) im Jahr 2006 wurden in Anlehnung an die Erfahrungen und Resultate der Rezentstudie geplant und angelegt. Dabei wurden die Versuchseichen verschiedenen extremen Umwelteinflüsse wie Frost, Trockenstress, Defoliation oder Hochwasser ausgesetzt. Da der Beginn der Wachstumsphase von Eiche zu Eiche sehr unterschiedlich sein kann, wurde jedes Experiment

individuell gestartet und beendet - abhängig vom Entwicklungszustand der Versuchseiche und dem Typ des Experiments. Jeder Baum wurde einem einzigem, eigenen Experiment unterzogen; Kombinationen von simulierten Umwelteinflüssen an einer individuellen Versuchseiche wurden nicht durchgeführt. Unklar zu interpretierende Ergebnisse sollten so vermieden werden.

Im Experiment kam es darauf an, (i) die bereits bekannten holzanatomischen Anomalien aus rezenten Eichen zu verifizieren und (ii) evtl. unbekannte holzanatomische Veränderungen zu dokumentieren.

Der Vorteil eines solchen Experiments liegt in erster Linie darin, eine Vielzahl von Bäumchen unter homogenen Bedingungen einem Stressor (simulierter Umwelteinfluss wie z.B. Frost) auszusetzen. Ein weiterer nicht zu unterschätzenden Vorteil birgt die Tatsache, dass nach Beendigung des Experiments die Bäumchen geerntet und komplett untersucht werden können (inkl. Wurzeln und Ästen).

Die Versuchseichen wurden, nach intensiver Begutachtung von Habitus, Blätter und Krone, auf die unterschiedlichen Versuche verteilt. Vitale, sehr gesund wirkende Versuchseichen verteilten sich mit weniger vitalen gleichmäßig auf die Experimente auf.

An Kontrollen (Anzahl: 5 Bäume) wurden keine Versuche durchgeführt. Sie wurden regelmäßig bewässert.

2.10.4.1 Simulation von Frost-Ereignissen zu Beginn der Vegetationsperiode (Spätfrost)

Es wurden tiefe Spätfröste zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten während der Vegetationsperiode simuliert. Fröste zu Beginn der Wachstumsperiode – bei Bruch der ersten Knospen (Anzahl: 5 Bäume) – fanden zwischen dem 27. April und 08. Mai 2006 und Fröste – nach Entfaltung der Blätter (Anzahl: 5 Bäume) – zwischen dem 08. Mai und 13. Juni 2006 statt. Die Durchführung der Frostversuche zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten des Baumwachstums zielte darauf ab, den Effekt abrupt auftretender tiefer Temperaturen (Fröste) auf das Früh- und Spätholz zu testen. Die Frostversuche fanden nachts statt.

Damit große Teile des Stammes und der Krone durch tiefe Temperaturen beeinträchtigt werden konnten, lagen die Versuchseichen in eine handelsübliche Gefriertruhe (Liebherr GT 6002) mit 554 Liter Nutzinhalt. Die Töpfe inklusive Wurzelballen wurden mittels isolierendem Füllmaterial umgeben und so während des Versuchs vor Frost wirksam geschützt. Den Temperatur-Verlauf während des Experiments zeichnete ein Thermo-Hygrograph (Typ 252 Ua, Wilhelm Lamprecht, Göttingen) auf. Um die Temperaturen innerhalb der Gefriertruhe nicht zu tief abzusenken, wurde der Deckel stets offen gehalten. Es herrschten auf Höhe des Thermo-Hygrographen (etwa auf halber Höhe der Gefriertruhe angebracht) Temperaturen zwischen minus 12° und minus 18°C bei einer relativen Luftfeuchte zwischen 55 und 99%. Da diese Temperaturen sehr niedrig waren, war zu befürchten, dass die Versuchsbäume die Temperaturen nicht lange aushalten würden. Die Länge des Experiments lag, je nach Stammdurchmesser, zwischen 2 und 4 Stunden. Nach Beendigung wurden die Versuchsbäume zurück an ihren vorherigen Platz im Pflanzenkäfig gestellt.

2.10.4.2 Simulation von Trockenstress während der Vegetationsperiode

Die Trockenstressversuche zielten darauf ab, den Einfluss von Wassermangel während der Frühholz- und Spätholzbildung zu verifizieren. Um einen Wassermangel während der Frühholzbildung zu simulieren, musste der Versuch schon am Ende der Vegetationsperiode 2005 gestartet werden. Die Töpfe der vorgesehenen Versuchseichen (Anzahl: 6 Bäume) wurden Ende 2005 in zwei äußerst reißfeste Tüten gestellt, um das Wurzelsystem vor Boden- oder Gießwasser zu schützen. 10 cm über dem Topf wurden zwei „Mitteldichte Faserplatten“ in horizontaler Richtung am Stamm wasserdicht mit Lac Balsam® befestigt, um den Wurzelballen vor Regenwasser bzw. Schnee abzuschirmen (vgl. Abb. 2-10). Kontrollierte Wassergaben fanden während des Experiments nicht statt. Sobald sich die Blätter der Versuchseichen voll entwickelt hatten oder sich starke Trockenschäden (z.B. vergilben der Blätter) zeigten, wurden die Eichen wieder ausreichend gewässert.



Abb. 2-10: Experiment zum Trockenstress. Versuchseiche #37 nach Beginn des Trockenstress-Experiments (Juni 2006). Der Topf (nicht sichtbar) wurde von unten mit zwei reißfesten Tüten vor Bodenflüssigkeit und von oben mit zwei „Mitteldichten Faserplatten“ gegen Regen geschützt.

Bei den Trockenstressversuchen während der Spätholzbildung wurde technisch gleich verfahren. Die Versuche starteten an allen Versuchsbäumen (Anzahl: 6 Bäume) am 02. Juni 2006. Der Versuch wurde ausgeführt, bis deutlich sichtbare Trockenschäden im Kronenbereich festzustellen waren, jedoch vor dem Absterben der Bäume beendet. Die Versuchseichen erhielten im Anschluss an das Experiment bis zum Ende der Vegetationsperiode ausreichende Wassergaben.

2.10.4.3 Simulation von Insektenkalamitäten (Defoliation)

Mit den Defoliationsversuchen wurden Kalamitäten von Insekten simuliert, die in Mitteleuropa im Frühjahr und Sommer z.B. durch Maikäfer (*Melolontha melolontha*), Junikäfer (*Rhizotrogus marginipes*), Großer Frostspanner (*Erannis defoliaria*) oder den Eichenprozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea*) auftreten können.

Insekten-Kalamitäten wurden erzeugt, indem die Versuchseichen im Frühjahr nach der Blattentfaltung – aber vor der endgültigen Blattentwicklung – komplett binnen einer Stunde entlaubt wurden (Anzahl: 6 Bäume). Da Knospenbruch, und damit die Blattentwicklung, individuell sehr unterschiedlich stattfand, schwankte der Zeitpunkt der Entlaubung je nach Versuchseiche zwischen dem 08. Mai und 08. Juni 2006. Die Blätter wurden mit einer Schere am Blattspreitengrund abgeschnitten und gesammelt. Große Aufmerksamkeit wurde darauf gelegt, die Apikal- und Seitenknospen nicht zu beschädigen. Von den entfernten Blättern wurde das Frischgewicht und anschließend (nach Trocknung in einem Trockenschrank bei 60°C über 24 Stunden) das Trockengewicht bestimmt.

Bei der Simulation von Insekten-Kalamitäten im Sommer wurde technisch gleich verfahren. Die Versuchseichen wurden am 15. und 16. Juni 2006 (Anzahl: 5 Bäume) ebenfalls komplett entlaubt sowie das Frisch- und Trockengewicht der Blätter bestimmt. Apikal- und Seitenknospen wurden nicht beschädigt.

2.10.4.4 Simulation von Hochwasser (Überflutung)

Hochwasserversuche wurden im Frühjahr, Früh- und Spätsommer 2006, demnach während der Frühholz- und Spätholzbildung, durchgeführt. Da sich nicht nur die Höhe, sondern auch die Retentionszeit des Wassers am Stamm auf die Überflutungstoleranz und die Baumphysiologie auswirkt (z.B. Cermak et al., 1982; Yamamoto und Kozlowski, 1987; Dreyer et al., 1991; Schmull und Thomas, 2000; Späth, 2002), wurden die Hochwasserversuche wie folgt durchgeführt:

- Simulation von Frühjahr-Hochwasser über 4, 8 und 12 Wochen. Beginn: Bruch der ersten Blattknospen (zwischen 19. und 26. April 2006; Anzahl: 10 Bäume).
- Simulation von Frühsommer-Hochwasser über 4, 8 und 12 Wochen. Beginn: 01. Juni 2006 (Anzahl: je 4 Bäume; Gesamt: 12 Bäume)
- Simulation von Spätsommer-Hochwasser. Zeitspanne: 01. Juli bis 31. August 2006 (Anzahl: 4 Bäume)

Hochwasser wurde simuliert, indem Versuchseichen samt Topf in je eine 200 Liter fassende Tonne gestellt und mit Leitungswasser bis zum Rand gefüllt wurde (Abb. 2-11). Die behandelten Bäume standen so insgesamt 90cm tief im Wasser. Die Überflutung am Stamm betrug 50 cm. Um Algenblüten und anaerobe Verhältnisse zu vermeiden, fand zwei mal die Woche ein Wasserwechsel statt (jeweils 100 Liter). Nach Beendigung der Versuche wurden die Eichen an den früheren Platz gestellt und regelmäßig gewässert.



Abb. 2-11: Simulation eines Frühjahr-Hochwassers vom 19. April bis 18. Juni 2006. Die Bäume stehen samt Topf in 200 Liter Regentonnen. Die Überflutungshöhe entlang des Stammes betrug 50 cm.

2.11 Messung der Querschnittsfläche von Frühholz-Tracheen mittels Bildanalyse-Software

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten bildanalytischen Messungen von Frühholz-Variablen wurden mit zwei unterschiedlichen bildanalytischen Messprogrammen durchgeführt.

Messungen an rezentem Eichenmaterial wurden mittels einer semi-automatischen Bildanalyse-Software erstellt (TRIAS – Tree-Ring Image Analysis Software). Prof. Dipl.-Ing. E. Kienzle (Esslingen/N., Deutschland) pro-

grammierte das Programm basierend auf MATLAB®. Die Software wurde gezielt entwickelt, um semi-automatsiche Bildanalyse-Messungen an rezentem und subfossilem Eichenmaterial durchzuführen. Mittels TRIAS konnten Messungen zeitsparend an einer großen Anzahl von Proben vorgenommen werden. Rezentes Eichenmaterial von drei Standorten (Zeitraum von 1950-2003) wurde mit einer ersten Version der Bildanalyse-Software im, während eines Aufenthalts am Institute of Forest Ecology and Forest Management an der Wageningen University (NL), vermessen (in Zusammenarbeit mit Assist. Prof. Dr. Ute Sass-Klaassen). Die Messungen konnten aufgrund einer verbesserten Version ausgeweitet werden (Jahrringe ab 1865-2003). Die Chronologiebildung erfolgte unter Anwendung der Methoden in Kapitel 2.5.

Für die Messungen der Querschnittsfläche von Frühholz-Tracheen an Versuchseichen wurde die Software UTHSCSA ImageTool (Wilcox et al., 1995-2002); http://ddsdx.uthsc-sa.edu/dig/itdesc.html) verwendet. Dies ist eine frei zugängliche Software und enthält keine automatisierten Messprozesse, jede Querschnittsflächen-Messung musste manuell erstellt werden.

2.11.1 Messung der Querschnittsflächen von Frühholz-Tracheen an rezenten Eichen mittels einer semi-automatischen Bildanalyse-Software (TRIAS)

Die Entwicklung und Anwendung der semi-automatischen Bildanalyse-Software TRIAS (=Tree-Ring Image Analysis Software), die in diesem Kapitel näher erläutert werden soll, fand teilweise während eines mehrmonatigen Aufenthaltes am Institute of Forest Ecology and Forest Management (FEM), Wageningen University, The Netherlands (in Zusammenarbeit mit Assist. Prof. Dr. Ute Sass-Klaassen) statt.

Zur semi-automatischen Bildanalyse-Messung jährlicher Frühholz(FH)-Variablen (holzanatomische Variablen) wurde der Querschnitt der präparierten Bohrkerne (Kap. 2.4) mit einem Scanner (Epson Expression 10000 XL) erfasst. Die Auflösung betrug 4800dpi. Die Ränder der digitalen Bohrkernbilder wurden in Adobe® Photoshop® abgeschnitten. Dieses Verfahren erwies sich als optimal für dieses bildanalytische Verfahren. Die so erstellten Bilder konnten dann in der Bildanalyse-Software TRIAS vermessen werden.

Die einzelnen Prozessschritte zur Messung der jährlichen FH-Gefäßflächen-Parameter mittels semi-automatischer Bildanalyse-Software zeigt Abbildung 2-12. Im ersten Programmabschnitt zerlegt die Software das original RGB-Bild in die verschiedenen Farbkanäle (Rot, Grün, Blau). Der Anwender hat nun zu entscheiden, welcher der Farbkanäle den besten Kontrast bietet. Bei den hier vermessenen Bildern wurde ausschließlich der Blau-Kanal verwendet. Im nächsten Schritt zerlegt die Software das Blau-Kanalbild in kleinere Teilbilder um das Arbeiten am Computerbildschirm zu erleichtern. Dies führt zu einer Erhöhung der Bild-Verarbeitungsgeschwindigkeit und der Messgenauigkeit. Nachfolgend wird mit jedem Einzelbild gleich verfahren.

Anhand eines Schwellenwertes wird ein binäres Bild generiert. Hier entscheidet der Anwender manuell (über ein Histogramm), welche Graubereiche zu schwarz und welche zu weiß umgesetzt werden sollen.

In den so erstellten binären Teilbilder folgen, wenn nötig, nun interaktive Operationen (für detaillierte Erläuterung der einzelnen Schritte siehe anschließenden Text).

- Löschen von Bildfehlern und fehlerhaft dargestellten Tracheen
- Erstellen von gelöschten und fehlerhaft dargestellten Tracheen
- Trennen von optisch zusammen liegenden Tracheen
- Detektieren der Markstrahlen (manuell)
- Erstellen von Jahrringgrenzen (semi-automatisch)
- Berechnung der FH-/SH-Grenzen (voll-automatisch)

Die Jahrringgrenzen-Detektierung erfolgt auf semi-automatischen Wege. Relativ gleichmäßig verlaufende Jahrringgrenzen können automatisch detektiert werden, die Möglichkeit der manuellen Jahrringgrenzen-Detektion ist immer gegeben. Die hier angewandte Definition der Jahrringgrenze beruht auf der Annahme, dass die Tracheen der ersten Frühholz-Reihe mit der Jahrringgrenze zusammenfallen; dies ist in guter Näherung gegeben.

Die FH-Grenzendetektierung erfolgt hingegen voll-automatisch, indem der Verlauf der Jahrringgrenze parallel Richtung nächster Jahrringgrenze versetzt wird. Die FH-Grenze entspricht derjenigen Lage, an der ihr Anteil 30% von Tracheen belegt (also weiß) ist. Dieser Prozent-Anteil wurde experimentell von Prof. Dipl.-Ing. E. Kienzle ermittelt und entspricht in guter Näherung dem Parenchym-Bereich, in dem die FH-Gefäße zu liegen kommen.

Die Detektierung der Markstrahlen erfolgte im Blau-Kanalbild auf manuellem Wege. Die Markstrahlen wurden mittels ziehen eines Polygons (Struktur, die mit mehreren Punkten umrandet werden kann) umfahren. Die Verlustflächen aufgrund von Markstrahlen im Frühholz konnten so berechnet werden. Die Verlustflächen entsprechen dem Bereich im Frühholz, der von radial verlaufenden Markstrahlen durchquert wird. Die Netto-FH-Fläche selbst berechnet wie folgt: FH-Netto-Fläche = FH-Bruttofläche (gesamte FH-Fläche) minus FH-Verlustfläche (FH-Markstrahlfläche). Die Berechnung der FH-Netto-Fläche ist für FH-Parameter wie beispielsweise der Leitquerschnittsfläche [%] nötig, die die verfügbare wasserleitende Querschnittsfläche im Frühholz darstellt. Da nahezu alle Markstrahlen eine sehr geradlinige Struktur haben, ist die Umrandung durch ziehen eines Polygons nicht zeitaufwändig.

Bei den Berechnungen kommen Bildverarbeitungs-Algorithmen zum Einsatz, wie Kontrastverbesserung durch Histogramm-Einebnung, Segmentierung von Objekten mit Schnellwertverfahren und Etikettierung von Objekten. Die Verfahren sind den jeweils ausgewerteten Bildern angepasst, da es bild-bedingt zu unterschiedlichen Grauwerten der Einzelbilder kommen kann.

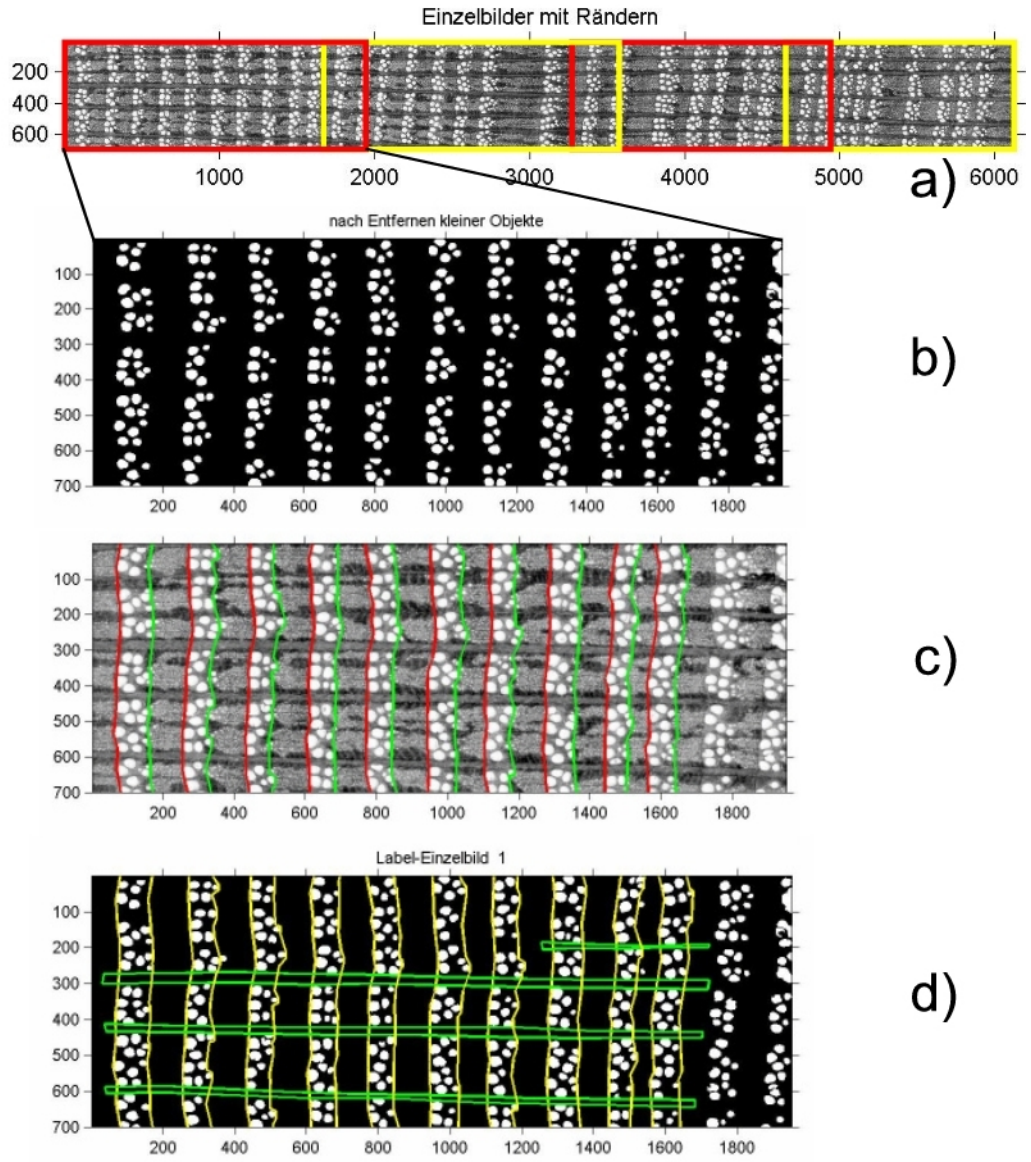


Abb. 2-12: Prozessabfolge der Bildanalyse-Messungen. Das RGB-Bild (Rot, Grün, Blau) wird in den ersten Schritten in die Bildkanäle zur Kontrastverbesserung zerlegt (hier: Blaukanal), in kleinere überlappende Teilbilder (rote und gelbe Rechtecke) aufgetrennt **(a)** und je in ein Binärbild (schwarz/weiß) umgewandelt **(b)**. Im Anschluss werden interaktiv Spätholz(SH)-Gefäße mittels eines Größenfilters entfernt und fehlerhafte Tracheen rekonstruiert, gelöscht bzw. getrennt. Interne Verarbeitungsprozesse laufen am Binärbild ab, interaktive Messprozesse sowohl am Binär- als auch am Blaukanal-Bild. Die Jahrringgrenzen-Detektierung (rote Linien) erfolgt auf (semi-)automatischem Wege, die Frühholz(FH)-Grenzendetektierung (grüne Linien) voll-automatisch **(c)**. Nach manueller Eingabe von Markstrahlen (grüne Polygone) erfolgt die Berechnung der FH-Parameter **(d)**.

Aufgrund der bekannten Bild-Auflösung (hier: 4800dpi) erfolgt der „Output“ direkt in absoluten Werten (z.B. µm, µm²). Die gemessenen jährlichen Frühholz(FH)-Variablen (holzanatomische Variablen) waren unter anderem:

- Anzahl der Tracheen [n] im Jahrring (gesamt und erste FH-Reihe)
- Maximale, minimale, mittlere, mediane Querschnittsfläche [µm²] aller Tracheen im Jahrring, von Tracheen direkt zur Jahrringgrenze (erste FH-Reihe) sowie der 5-größten Tracheen im Jahrring
- FH-Gefäßdichte [n/mm²] im Jahrring
- RW-, LW-, FH-Breite [µm] des Jahrringes
- FH-Leitquerschnittsfläche [%] im Jahrring
- zugehörige Standardabweichungen...

Die Vermessung der Bohrkerne (Fotos der Radien) erfolgte separat und nacheinander. Gemessen wurden zwei Proben je Baum (Radius A und B), diese wurden zu einer Baummittelkurve arithmetisch gemittelt. Da die holzanatomischen Variablen einem biologischen Trend unterliegen, wurden die Variablen relativ zur Distanz des Marks umgerechnet. Die Erstellung der trendbereinigten Standortschronologien aus Baummittelkurven wurden in Arstan (Cook, 1985) berechnet (Kap. 2.5) und zur Berechnung von Klima-Wuchsbeziehungen herangezogen (Kap. 2.8.4).

2.11.2 Messung der Querschnittsflächen von Frühholz-Tracheen an Versuchseichen

Für das Vermessen der Frühholz(FH)-Gefäßflächen in den Versuchseichen musste auf eine andere Software zurückgegriffen werden, da TRIAS für lange Zeitreihen ausgelegt ist. Da bei den Versuchseichen aber nur FH-Gefäßflächen einzelner Jahr vermessen und untersucht wurden, sind diese mit der frei zugänglichen Software UTHSCSA ImageTool (Wilcox et al., 1995-2002); http://ddsdx.uthscsa.edu/dig/itdesc.html) erstellt worden.

Gemessen wurden die FH-Gefäßflächen der Versuchseichen für die Simulation des Frühjahr-Hochwassers und der Kontrolleichen. Um die Anzahl der Kontrollen zu erhöhen, wurden ebenfalls Versuchseichen der Sommerhochwasser verwendet. Da während der FH-Bildung kein Versuch stattfand sind diese den Kontrollen gleich zu setzen. Da die Länge des simulierten Hochwassers variiert (zwischen 4 und 12 Wochen), der Anfangszeitpunkt aber bei allen Bäumen gleich gewählt wurde (Zeitpunkt des Knospenaufbruchs), wurden, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, nur die Querschnittsflächen derjenigen Tracheen vermessen, die unmittelbar an der Jahrringgrenze ansetzten.

Die Flächenmessungen wurden an digitalen Bildern von Mikrotom-Dünnschnitten erstellt (Kap. 2.9.1). Diese wurden mit einer Canon Powershot A95 (5 Megapixel), die mit einer Adapteroptik auf einem Durchlichtmikroskop (Standard 14, Carl Zeiss) befestigt war, unter Verwendung der gleichen Vergrößerung, erstellt. Jedes Einzelbild musste in die Software eingeladen und die Tracheen mittels Polygonen möglichst genau umfahren werden. Die so gemessenen Pixelwerte konnten in ein Tabellen-Kalkulationsprogramm übertragen und anhand eines Maßstabs in Quadrat-Mikrometer (µm²) umgerechnet werden.

Die Flächenmessungen fanden in einer Stammhöhe von 20cm sowie teilweise entlang des gesamten Stammes (20cm – 120cm) in Abständen von 20cm statt. Die gemessene Tracheen-Anzahl je Höhe betrug 15 und 25.

2.12 Beschreibung der holzanatomischen Anomalien in rezenten Eichen

Die nachstehenden Unterkapitel befassen sich mit der Beschreibung, Dokumentation und Vorkommen holzanatomischer Anomalien in lebenden (rezenten) Eichen. Zuvor wird die anomaliefreie holzanatomische Struktur eines Jahrringes ohne eine Veränderung beschrieben (Kapitel 2.12.1). Nachfolgend sollen holzanatomische Veränderungen aufgeführt werden, die klar als solche definiert werden können, innerhalb einer oder mehrerer Eichen zu finden und mittels Auflicht-Mikroskopie bis 50-facher Vergrößerung erkennbar sind.

Die Benennungen und die Abkürzungen erfolgten in starker Anlehnung an Leuschner und Schweingruber (1996) und wurden gegebenenfalls leicht verändert und erweitert. Eine tabellarische Kurzübersicht von holzanatomischen Anomalien – rezenter sowie subfossiler - findet sich im Anschluss an Kapitel 2.13 bzw. in Tabelle 2-6.

2.12.1 Anomaliefreie holzanatomische Struktur des Jahrringes einer rezenten Eiche im Querschnitt

Abbildung 2-13 zeigt ein mikroskopisches Bild des Holzes einer lebenden (rezenten) Eiche (*Q. robur* L.) im Querschnitt, frei von anatomischen Anomalien. Zu sehen ist die typisch ringporige Anordnung der großen Frühholz-Tracheen (T), die Durchmesser bis zu 400 µm erreichen können und einen ein- bis mehrreihigen Porenkreis bilden. Die Spätholz-Tracheen (SHT) sind ungleich kleiner. Ein- bis mehrreihige (bis ca. 20 Zellen) Holzstrahlen (HS) durchziehen die Jahrringe in radialer Richtung. Parenchymatische Zellen sind reichlich vorhanden und liegen unregelmäßig in lockeren Bändern (PB) tangentialer Richtung vor. Das Grundgewebe besteht aus Libriformfasern, Fasertracheiden und vasizentrischen Tracheiden, zusammenfassend auch Fasergewebe (FG) genannt.

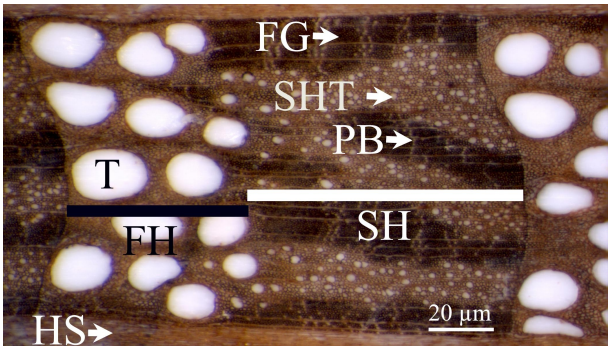


Abb. 2-13: Typische ringporige Jahrringstruktur im Kernholz einer adulten Eiche des Standortes Euerheim/Main im Jahr 1965. Vergrößerung 32-fach. - FH=Frühholzbereich, SH=Spätholzbereich, T=Frühholz-Trachee, SHT=Spätholz-Trachee, PB=Parenchymatisches Band, FG=Fasergewebe, HS=Holzstrahl.

2.12.2 Dichtebänder (Merkmale C, D, E)

Als Dichteband wurde eine Struktur definiert, die aus zwei- bis mehrreihigen radial abgeflachten Zellen bestand (Abb. 2-14). Diese Strukturen hoben sich zumeist deutlich von der typischen Jahrringstruktur ab. Im Durchlicht zeigten die radial abgeflachten Zellen eine starke Verminderung des Zelllumens; die Zellwandbreiten blieben, im Vergleich zu umgebenden Zellen, unverändert. Diese Zellanordnung ist vergleichbar mit der typischen Anordnung von Kambiumzellen nach perikliner Teilung und vor weiterer Ausdifferenzierung; es entsteht der Eindruck von Backsteinen, die reihig, direkt übereinander gelegt worden sind.

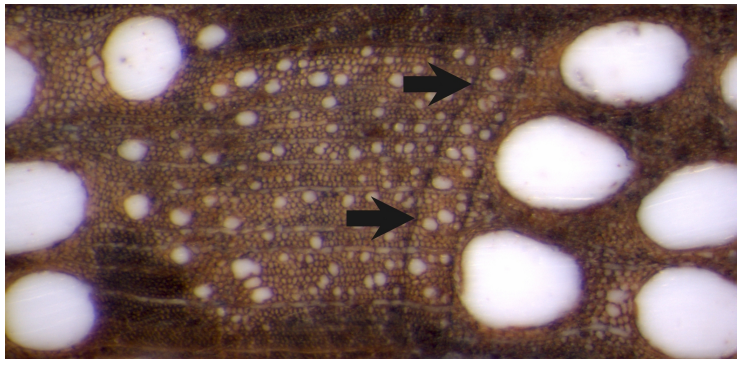


Abb. 2-14: Dichteband im Spätholz (Merkmal D) im Jahr 1975. Standort Euerheim/Main. Vergrößerung 50-fach. - Pfeile = Dichteband.

Die direkt nachfolgenden Spätholz-Tracheen wiesen meist eine geringe, aber deutlich sichtbare Vergrößerung der Querschnittsflächen auf. Zellen des weiteren Zuwachses nach dem Dichteband waren in Form, Größe (Ausnahme siehe oben), Anordnung und Zusammensetzung unverändert gegenüber unveränderter Zuwachsbereiche des Jahrringes. Eine Häufung mehrerer Dichtebänder pro Jahrring kamen in den untersuchten Eichen nicht vor.

Die Lage eines Dichtebandes konnte verschiedene Positionen innerhalb eines Jahrringes einnehmen: Direkt an der Grenze zwischen Früh- und Spätholz (Merkmal C), im Spätholzbereich (Merkmal D) und am Ende eines Jahrringes mit anschließendem Zuwachs von einer Tracheen-Reihe (Merkmal E).

2.12.3 Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F)

Unter Merkmal F (Abb. 2-15) sollen verformte und kollabierte Frühholz(FH)-Tracheen verstanden werden, die sich in Struktur, Form und Füllung von „normalen“ unterscheiden: Sichel- bis halbmondförmige Strukturen bzw. auffällig intensive Verthyllungen im Lumen der Gefäße.

Die Verformung zu sichel- bis halbmondförmiger Struktur lässt sich auf die Ausbildung traumatischen Gewebes direkt im Anschluss an FH-Tracheen zurückführen, das durch Wachstum die noch unverholzten Tracheen in die typische Struktur brachte. Verformte FH-Tracheen sind daher nahezu immer mit Merkmal T (Kap. 2.12.4) in Kombination anzutreffen.

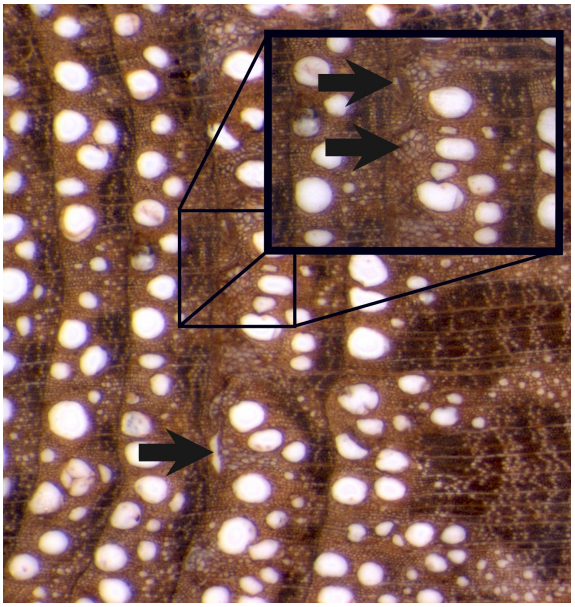


Abb. 2-15: Verformte oder kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) aus dem Jahr 1913. Standort Freudenberg/Main. Vergrößerung 32-fach. - Pfeile = Verformte oder Kollabierte Frühholz-Tracheen.

Verformte und kollabierte FH-Tracheen traten meist in Kombination auf. Nur selten konnten kollabierte FH-Tracheen gefunden werden – alleinig verformte fanden sich in keinem Jahrring.

Verformte und kollabierte FH-Tracheen fanden sich nahezu ausschließlich direkt zu Beginn des Frühholzes (erster FH-Porenkreis) und nur selten inmitten oder gegen Ende des Frühholzes.

Der Frühholz-Zuwachs kann als „gesteigert“ beschrieben werden, was durch ausbilden neuer und funktionsfähiger FH-Tracheen in neuen Porenkreisen zustande kommt. Der Zuwachs des Spätholzes blieb in allen Fällen „unauffällig“.

Die Holzstrukturen und Zuwächse des folgenden Jahres waren in keinem Jahrring auffällig verändert. Merkmal F trat häufig in den Proben auf.

2.12.4 Traumatisches Gewebe (Merkmal T)

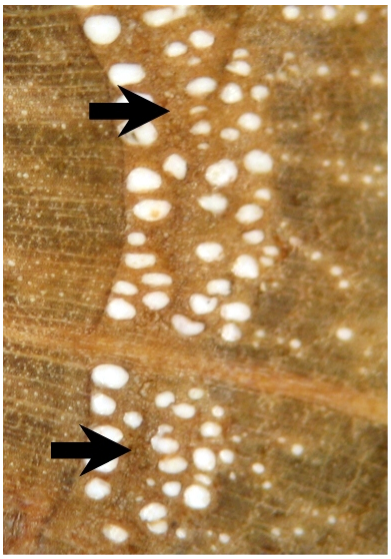


Abb. 2-16: Traumatisches Gewebe (Merkmal T) aus dem Jahr 1871. Standort Dettelbach/Main. Vergrößerung 32-fach. - Pfeile = Traumatisches Gewebe.

Merkmal T ist gekennzeichnet durch ungeordnete und stark vergrößerte parenchymatische Zellen (Abb. 2-16). Charakteristisch ist die starke Vergrößerung der Zellen des Grundgewebes, die zudem unverholzt erscheinen und große Interzellularen aufweisen. Das Auftreten kann flächenhaft bis hin zu kleinen, lokalen Bereichen im Früh- und Spätholzbereich sein.

Prinzipiell lässt sich traumatisches Gewebe entlang des gesamten Jahrring-Querschnittes finden. Eine flächenhafte Ausbildung kam aber meist nur im Frühholzbereich zur Ausprägung. Im Spätholzbereich fand sich dagegen nur sehr selten eine flächenhafte Ausbildung, hier beschränkte sich das Merkmal T auf kleinere, sehr lokale Bereiche.

Beim Auftreten traumatischen Gewebes im Frühholzbereich, vor allem zu Beginn des Jahrringes, ließ sich eine deutliche Steigerung des Frühholz-Zuwachses feststellen, was durch die anschließende Ausbildung neuer, unveränderter Holzstrukturen zu-

stande kam, und der Zuwachs sich dadurch verbreiterte. Es ließen sich keine Auswirkungen auf die Holzanatomie und den Zuwachs im Folgejahr feststellen. Auftreten von Merkmal T war sehr oft mit Merkmal F verbunden.

2.12.5 Abrupte Variation der Frühholzbreite (Merkmale A+, A-)

Abrupte Schwankungen im Frühholzbreiten-Zuwachs wurden als Merkmal A definiert (Abb. 2-17), wobei eine Steigerung A+ und eine Verminderung A- benannt wurde. Merkmal A wurde nur vergeben, wenn es sich um eine weit überdurchschnittliche Steigerung/ Verminderung handelte.
Beispiel: Jahrringe mit stetigem drei reihigem Frühholzporenkreis, Jahr mit abrupter Verminderung auf einen FH-Porenkreis (Jahr mit Merkmal A-) und anschließenden Jahren mit weiterem dreireihigem FH-Porenkreis (bei Merkmal A+ entsprechend umgekehrt).

Die Holzanatomie und der Zuwachs im Folgejahr blieb davon unbeeinflusst.
Abrupte Variationen der Frühholzbreite, sowohl Verminderungen als auch Zunahmen, traten sehr selten auf.

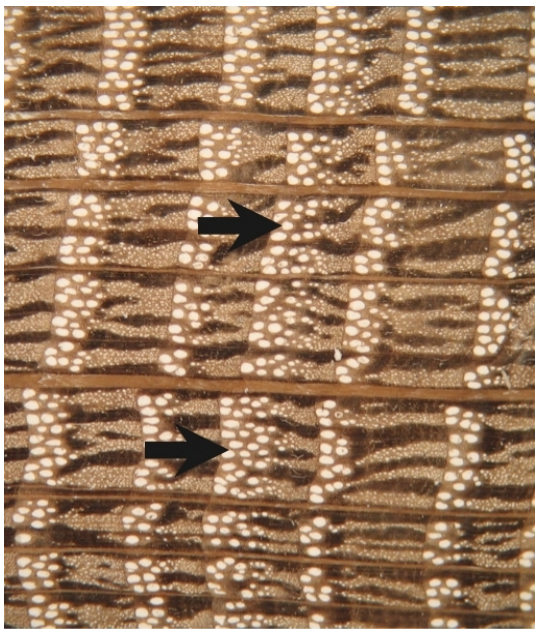


Abb. 2-17: Abrupte Verbreiterung der Frühholzbreite (Merkmal A+) im Jahr 1950. Standort Au/Rhein. Vergrößerung 6,5-fach. - Pfeile = Abrupte Verbreiterung der Frühholzbreite.

2.12.6 Fehlendes Spätholz (Merkmale N, N+)

Merkmal N wurde für Jahrringe vergeben, für die ein Fehlen oder zumindest eine sehr starke Reduktion des Spätholzes bzw. seiner Breite festgestellt werden konnte. Der Spätholz-Zuwachs musste mindestens um ¾ gegenüber dem Vorjahr reduziert sein, damit das Kriterium erfüllt war. Abbildung 2-18 zeigt eine solche Reduktion im Spätholz-Zuwachs des Jahres 1976 am Freudenberger Standort.

Als Merkmal N+ wurde eine Folge von zwei bis mehreren Jahren ohne Spätholz-Zuwachs bezeichnet. Der erste Jahrring der Abfolge erhielt dabei die Benennung (Beispiel: 1854 N+ = starke Reduktion des Spätholzes der Jahre 1854, 1855 und 1856).

Die Auswirkung von Jahren mit abrupter Reduktion des Spätholz-Zuwachses auf die Folgejahre fiel unterschiedlich aus: In vielen Fällen fand gleichfalls eine Reduktion des nachfolgenden Frühholzes statt, was meist mit einer diffusen Anordnung der Frühholz-Tracheen einher ging. Dies konnte allerdings nicht als konsistent angesehen werden, da Folgejahre ebenso, in Holzstruktur und Zuwachsbreiten, unverändert auftraten (Abb. 2-18); dies fand sich jedoch weit seltener.

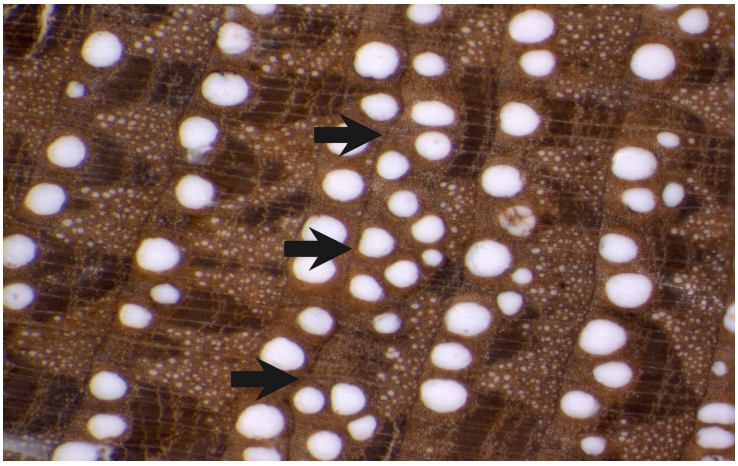


Abb. 2-18: Reduktion des Spätholzes (Merkmal N) im Jahr 1976. Standort Freudenberg/Main. Vergrößerung 20-fach. - Pfeile = Reduktion Spätholz.

Der Spätholz-Zuwachs des folgenden Jahres erwies sich in nahezu allen Fällen ebenso als vermindert. Ab dem zweiten Folgejahr fand sich weder in Struktur noch im Zuwachs von Früh- und Spätholz eine Veränderung.

Merkmal N trat sehr häufig auf, Merkmal N+ fand sich seltener.

2.12.7 Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV)

Das Merkmal „Schmale Frühholz-Tracheen“ (SEV = Small Earlywood Vessels), in Abbildung 2-19 zu sehen, beschreibt Frühholz(FH)-Tracheen, die stark verminderte Querschnittsflächen aufwiesen. In Jahren mit Merkmal SEV konnte keine auffällige Verminderung in der Anzahl der FH-Tracheen festgestellt werden, jedoch kam es zu einer plötzlichen Querschnittsverminderung im Vergleich zu den Jahren vor und nach diesen Jahren. Die Querschnittsflächen der Frühholz-Tracheen in Jahren des Merkmals SEV betrugen nur ein Drittel bis ein Viertel derer in den Jahren zuvor und danach.

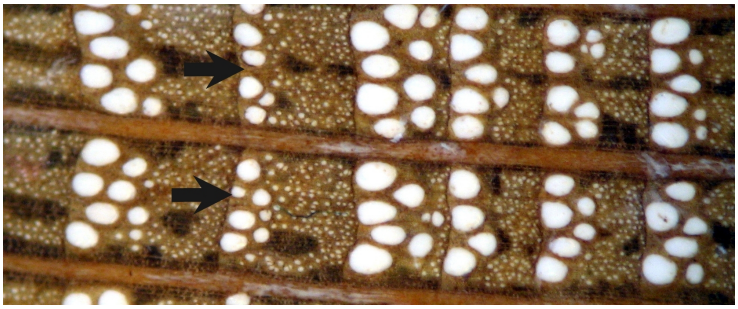


Abb. 2-19: Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV) aus dem Jahr 1948. Standort Euerheim/Main. Vergrößerung 25-fach. - Pfeile = Schmale Frühholz-Tracheen.

Auffällige Strukturen der Holzanatomie oder Zuwachsänderungen in den Jahren danach fanden sich nicht.

Das Merkmal „Schmale Frühholz-Tracheen“ fand sich sehr selten, ließ sich aber visuell gut erkennen und lässt sich mittels einer halbautomatischen Bildanalyse-Software quantitativ bestimmen (siehe Kap. 2.11).

2.12.8 Traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G)

Das Merkmal G wird definiert über traumatisch vergrößerte Tracheen im Spätholzbereich. Der Durchmesser einer typischen Spätholz(SH)-Trachee liegt zwischen 20 bis 60 µm. Die traumatisch vergrößerten Tracheen im Spätholz wiesen deutlich größere Durchmesser

(150 - 200 µm) als typische Spätholz-Tracheen auf, jedoch erreichten sie nicht die Durchmesser typischer Frühholz-Tracheen (200 - 400 µm). Visuell ließ sich diese holzanatomische Veränderung sehr gut detektieren (Abb. 2-20). Ein tangential durchgängiger Faserbereich zwischen Frühholz- und vergrößerten Spätholz-Tracheen fand sich in vielen Jahren mit Merkmal G, das sich als sehr markant herausstellte und als ein deutlicher Absatz zwischen Frühholz- und vergrößerten SH-Tracheen zu erkennen war. Trat das Merkmal G in Jahren mit schmaler Spätholzbreite auf, so zeigten sich dennoch die beschriebenen Strukturen, der tangential durchgängige Faserbereich zwischen Frühholz- und vergrößerten SH-Tracheen war auch hier konsistent, wenn auch sehr klein.



Abb. 2-20: Traumatisch vergrößerte Tracheen im Spätholzbereich (Merkmal G) des Jahres 1999. Standort Leimersheim/Rhein (oben), Au2/Rhein (unten). Vergrößerung 10-fach. - Pfeile = Traumatisch vergrößerte Tracheen.

Eine Auswirkung auf holzanatomische Strukturen oder Zuwachsbreiten im Folgejahr ließ sich nicht erkennen. Auffällig war eine homogene Größe (Durchmesser) der traumatischen Spätholz (SH)-Tracheen, die in Jahren mit Merkmal G, neben sehr großen Frühholz- und kleinen SH-Tracheen, eine zusätzliche Größenklasse in einer klar umrissenen Zuwachszone innerhalb solcher Jahrringe bildeten.

Merkmal G fand sich ausgesprochen selten, war aber deutlich in seiner Ausbildung zu erkennen.

2.12.9 Lokale Verletzungen (Merkmal V)

Bei lokalen, großflächigen Verletzungen, sowohl im Frühholz- als auch im Spätholzbereich, fand sich zu beiden Seiten der Verletzung eine Überwallungszone. Innerhalb dieser Überwallungszone, deren tangentiale Ausbreitung zwischen ein bis zwanzig Millimetern betragen kann, wies das Holz ungeordnete Strukturen auf. Frühholz-Tracheen waren verkleinert und in vergrößerte Zellen des Grundgewebes eingebettet. Abbildung 2-27 verdeutlicht diese Strukturen anhand einer subfossilen Eiche.

Aufgrund der Probenart (zumeist Bohrkerne mit 5 mm Durchmesser) und der Bohrkernentnahme an ungestörten Stammbereichen waren großflächige, lokale Verletzungen in der Rezent-Studie selten anzutreffen. Komplette Stammscheiben aber standen nur an zwei Standorten (Oppenheim/Rhein, Plieningen) zur Verfügung.

2.12.10 Merkmalskombinationen

In vielen Fällen trat ein Dichteband am Ende des Frühholzes (Merkmal C) verbunden mit einer starken Reduktion des Spätholz(SH)-Zuwachses (Merkmal N) auf. Jahre mit Dichtebändern inmitten des Spätholzbereichs (Merkmal D) zeigten hingegen meist einen weiteren, nicht unbeträchtlichen, SH-Zuwachs. Bei der Auswertung wurde diese Merkmalskombination als Merkmal C geführt.

Traumatisches Gewebe (Merkmal T) zu Beginn des Frühholzbereichs war gehäuft kombiniert mit verformten und kollabierten Frühholz-Tracheen (Merkmal F). Bei der Auswertung wurde diese Merkmalskombination als Merkmal F geführt.

2.13 Beschreibung der holzanatomischen Anomalien in subfossilen Eichen der Holozänen Eichen-Jahrringchronologie (HOC) Hohenheim

Ein Teilziel der vorliegenden Arbeit ist es holzanatomische Anomalien in subfossilem Eichenmaterial der HOC Hohenheim zu dokumentieren und zu beschreiben, um hieraus deren mögliche Nutzung z.B. als Klimaproxy abzuleiten und Grundlagen hierfür zu liefern. Hierbei kommt es vor allem darauf an, einen ganzheitlichen Überblick über die auftretenden Anomalien zu erhalten; hierfür wurden rund 250 subfossile Eichen aus verschiedenen Zeitepochen untersucht. Die meisten stammten aus der Zeit von ca. 8000–6000 BC (frühes Holozän, „8k-Event“), 4000–2000 BC (mittleres Holozän, „4k-Event“) und 500–1500 BP (Römerzeit). Im Folgenden wird die Untersuchung an subfossilem Eichenmaterial als „Subfossil-Studie“ bezeichnet.

Für einen anomaliefreien Querschnitt eines Eichenjahrringes sei auf Abbildung 2-13 verwiesen; die holzanatomischen Strukturen, in rezenten und subfossilen Eichenjahrringen, gleichen sich. Auch die holzanatomischen Anomalien subfossiler Eichen der HOC Hohenheim sind mit denen rezenter Eichen nahezu identisch und wurden dort (Kap. 2.12) ausführlich beschrieben.

Um einen Bezug zur Studie an rezentem Material herzustellen, folgt in den nächsten Abschnitten lediglich eine Kurzbeschreibung holzanatomischer Veränderungen subfossiler Eichen; sollten vereinzelt Unterschiede in der Holzanatomie oder im Früh-/ Spätholz-Zuwachs aufgetreten sein, so wird in den folgenden Abschnitten darauf eingegangen und die Variationen genau beschrieben.

Eine tabellarische Kurzübersicht von holzanatomischen Anomalien – rezenter sowie subfossiler - findet sich im Anschluss an dieses Kapitel bzw. in Tabelle 2-6.

2.13.1 Dichtebänder (Merkmal C, D, E)

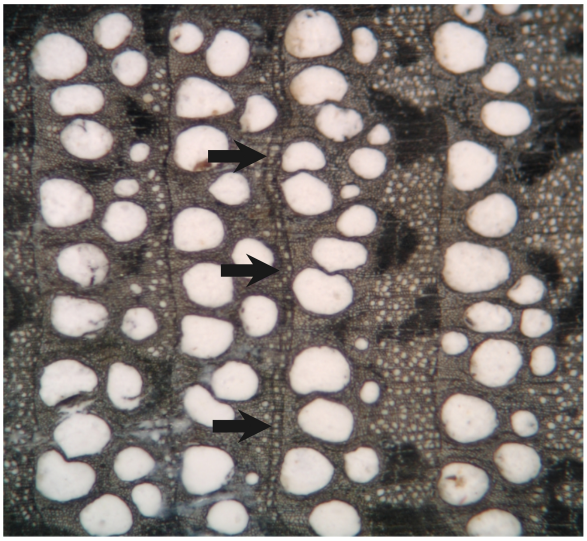


Abb. 2-21: Dichteband Ende Frühholz (Merkmal C) im Jahr 4819 BC. Fundort Pettstadt/Main. Vergrößerung 40-fach. - Pfeile = Dichteband Ende Frühholz.

Die gefundenen Dichtebänder subfossiler Eichen (Abb. 2-21) gleichen denen rezenter Eichen. Auch in subfossilen Eichen finden sich Dichtebänder an der Grenze zwischen Früh- und Spätholz, inmitten und am Ende des Spätholzes. Ebenfalls die Breite der Dichtebänder, von 2 bis 4 Zellreihen, ist sehr gut vergleichbar. Es scheint sich auch hier um nicht ausdifferenzierte Zellen zu handeln.
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.2.

2.13.2 Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F)

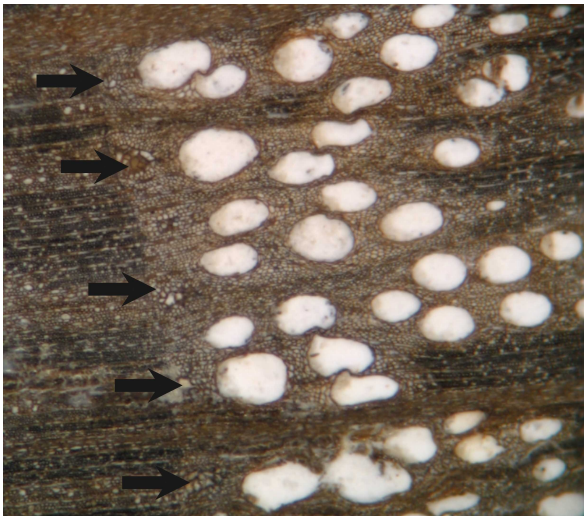


Abb. 2-22: Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) im Jahr 304 BC. Fundort Breitengüßbach/Main. Vergrößerung 50-fach. - Pfeile = Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen.

Dieses Merkmal ist in Struktur, Form und Ausprägung identisch mit den verformten und kollabierten Frühholz-Tracheen der rezenten Eichen. Meist tritt dieses Merkmal kombiniert mit traumatischem Gewebe auf, aber auch singuläres Auftreten ist zu verzeichnen (Abb. 2-22).
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.3.

2.13.3 Traumatisches Gewebe (Merkmal T)

Für Merkmal T in subfossilen Eichen gilt das gleiche wie für rezente Eichen. Auch in subfossilen Eichen findet sich traumatisches Gewebe, bei dem es sich um stark vergrößerte Zellen des Grundgewebes handelt, im Frühholzbereich meist in Kombination mit verformten und/oder kollabierten Frühholz-Tracheen (Merkmal F).
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.4.

2.13.4 Abrupte Variation der Frühholzbreite (Merkmal A+, A-)

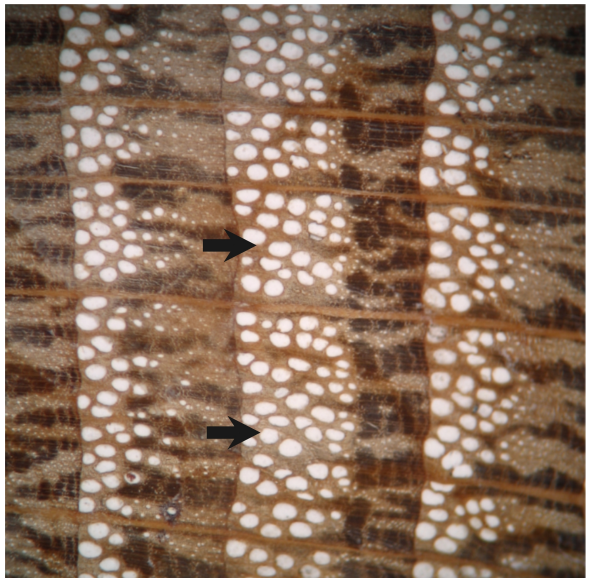


Abb. 2-23: Abrupte Variation der Frühholzbreite (Merkmal A+) aus dem Jahr 42 BC. Fundort Augsfeld/Main. Vergrößerung 6,5-fach. - Pfeile = Abrupte Variation der Frühholzbreite.

Bei abrupten Veränderungen der Frühholzbreite in subfossilen Eichen (Abb. 2-23), lässt sich keinerlei Unterschied zu den rezenten Eichen erkennen. Für das Merkmal A+ bzw. A- in subfossilen Eichen muss konstatiert werden, dass das Auftreten sehr selten war.
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.5.

2.13.5 Fehlendes Spätholz (Merkmal N, N+)

Jahrringe mit fehlendem bzw. stark reduziertem Spätholz finden sich in subfossilen Eichen häufig (Abb. 2-24). Merkmal N (Reduzierung des Spätholzes in einem Jahr, Abb. 2-24 links) unterscheidet sich zu den rezenten Eichen darin, dass deutlich weniger Zuwachs im Spätholz (SH) zu sehen ist. SH-Zuwächse von bis zu 0,8 mm unterbrochen von Zuwächsen mit 0,05 mm finden sich häufig; bei den untersuchten Rezent-Eichen lief die Variation im SH-Zuwachs weniger extrem ab. Und auch in der Ausprägung des Merkmals N+ (Reduzierung des Spätholzes in mehreren aufeinanderfolgenden Jahren, Abb. 2-24 rechts) zeigt leichte Variationen gegenüber den rezenten Eichen. Subfossile Eichen zeigen weit häufiger mehrjährige Zuwachsdepressionen des Spätholzes (Merkmal N+) als rezente Eichen. Ebenso findet sich eine längere Periode der Zuwachsreduzierung; zehn bis zwanzig Jahre mit sehr engem Spätholz sind keine Seltenheit in subfossilen Eichen der HOC Hohenheim.
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.6.

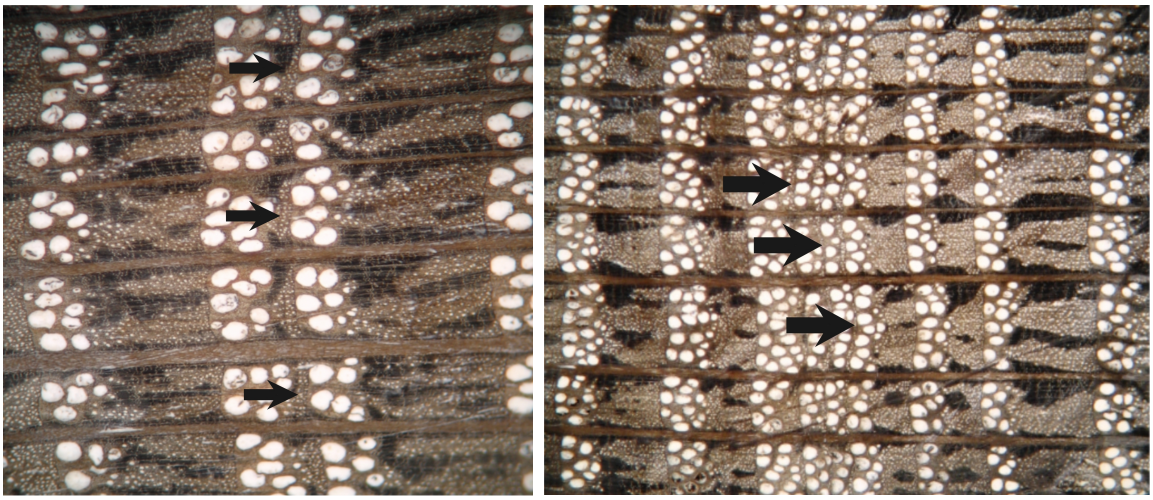


Abb. 2-24: Links: Fehlendes Spätholz (Merkmal N) aus dem Jahr 253 BC. Fundort Breitengüßbach/Main. Vergrößerung 20-fach. **Rechts**: Fehlendes Spätholz (Merkmal N+) ab dem Jahr 2495 BC. Fundort Lichtenau/Donau. Vergrößerung 8-fach. - Pfeile = Fehlendes bzw. stark reduziertes Spätholz.

2.13.6 Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV)

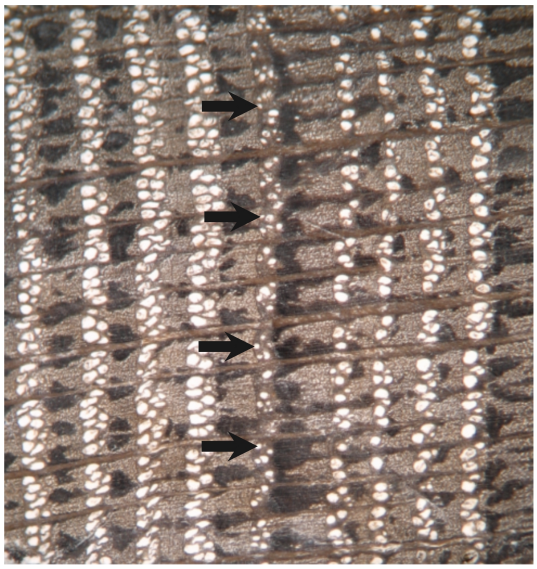


Abb. 2-25: Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV) im Jahr 2894 BC. Fundort Staffelbach/Main. Vergrößerung 10-fach. - Pfeile = Schmale Frühholz-Tracheen.

Die, im Vergleich zu den Vor- und Folgejahren, abrupte Reduktion der Tracheen-Querschnittsfläche zeigt sich ebenfalls in subfossilen Eichen (Abb. 2-25). Die Querschnittsflächen der Frühholz-Tracheen sind in anormalen Jahren mit denen der rezenten Eichen zu vergleichen und weisen keine weitere Verminderung des Querschnitts auf.
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.7.

2.13.7 Vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G)

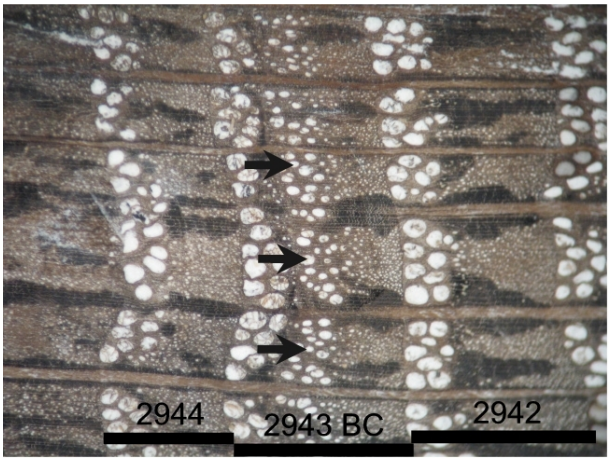


Abb. 2-26: Traumatisch vergrößerte Tracheen im Spätholzbereich (Merkmal G) im Jahr 2943 BC. Fundort Greffern/Rhein. Vergrößerung 10-fach. - Pfeile = Traumatisch vergrößerte Tracheen.

Die holzanatomische Anomalie „Vergrößerte Spätholz-Tracheen“ (Merkmal G) zeigt in subfossilen sowie in rezenten Eichen keinerlei Unterschiede. Charakteristisch ist auch in subfossilen Eichen ein Band von traumatisch vergrößerten Tracheen im Spätholzbereich, das sich deutlich von den Frühholz-Tracheen absetzt. Zwischen dem Frühholzbereich und den vergrößerten Tracheen im Spätholz findet sich auch hier eine, meist enge, Zone aus Fasergewebe (Abb. 2-26).
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.8.

2.13.8 Lokale Verletzungen (Merkmal V)

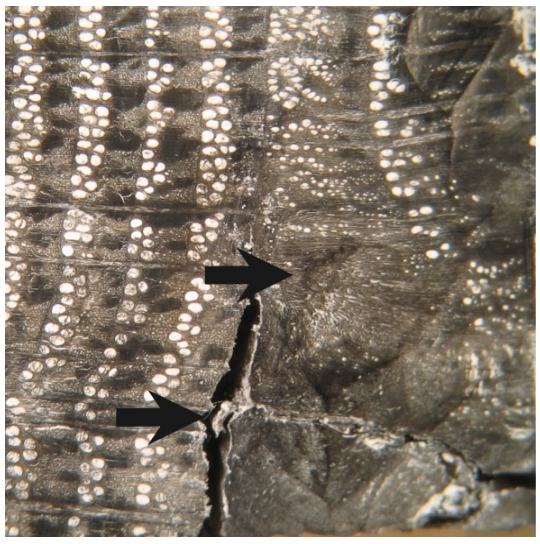


Abb. 2-27: Lokale Verletzung (Merkmal V) im Jahr 2903 BC. Fundort Stettfeld/Main. Vergrößerung 6,5-fach. - Pfeile = Lokale Verletzung mit Überwallungszone.

Großflächige, lokale Verletzungen sind in subfossilem Eichenmaterial gehäuft anzutreffen. Stammscheiben subfossiler Eichen erlauben, im Gegensatz zu der meist mit Bohrkernen durchgeführten Rezent-Studie, eine flächenhafte Untersuchung großer Bereiche im Holz der Stammquerschnitte. Abbildung 2-27 zeigt Merkmal V direkt am Anfang der Jahrringgrenze, die Verletzung trat im Winter 2904/2903 BC auf und ist zu Beginn der Vegetationsperiode überwallt worden.
Für eine detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 2.12.9.

2.13.9 Merkmalskombinationen

Es treten zwei Merkmalskombinationen auf: Kombiniert sind verformte, kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) mit traumatischem Gewebe (Merkmal T), sowie Dichtebänder am Ende des Frühholzes (Merkmal C) mit fehlendem bzw. stark reduziertem Spätholz-Zuwachs (Merkmal N).

2.14 Zusammenfassende Kurzübersicht holzanatomischer Anomalien in rezenten und subfossilen Eichen

Die Benennungen und die Abkürzungen erfolgten in starker Anlehnung an Leuschner und Schweingruber (1996) und wurden gegebenenfalls leicht verändert und erweitert (eine Auflistung gibt nachstehende Tab. 2-6). Hierzu zählen Dichtebänder, die abhängig ihrer Lage im Jahrring, als Merkmal C, D und E benannt werden. Abrupte ein- bzw. mehrjährige starke Zuwachsreduktionen des Spätholzes werden als Merkmal N bzw. N+, abrupte Zuwachssteigerung bzw. -reduktion des Frühholzes als Merkmal A+ bzw. A- aufgeführt. Unübliche, erkennbare Veränderungen im Tracheen-Querschnitt werden im Frühholzbereich als Merkmal SEV (anomale Querschnitts-Verminderung der Frühholz-Tracheen) und im Spätholzbereich als Merkmal G (anomale Querschnitts-Vergrößerung der Spätholz-Tracheen) bezeichnet. Für großflächige Verletzungen des Kambiums, die als sogenannte „Scars“ erkennbar sind, ist die Merkmalsbezeichnung V, und für traumatisches Gewebe die Merkmalsbezeichnung T vergeben. Für verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen ist die Merkmalsbezeichnung F gewählt worden.

Tab. 2-6: Benennung und Beschreibung holzanatomischer Anomalien in rezenten und subfossilen Eichen in Anlehnung an Leuschner und Schweingruber (1996). Die aufgeführten holzanatomsichen Veränderungen treten in rezenten und subfossilen Eichen auf. - SH=Spätholz, FH=Frühholz

Benennung und Beschreibung holzanatomischer Anomalien	Abkürzung
Dichteband: stark radial abgeflachte Zellen im SH-Bereich	Merkmal C / D / E Abb. 2-14 / 2-21
Verformte & kollabierte FH-Tracheen: sichel- / halbmondförmige FH-Tracheen, meist mit starken Verthyllungen	Merkmal F Abb. 2-15 / 2-22
Traumatisches Gewebe: ungeordnete und stark vergrößerte parenchym. Zellen, meist im FH-Bereich	Merkmal T Abb. 2-16
Abrupte Variation der FH-Breite: deutliche Steigerung (A+) oder Verminderung (A-) der radialen FH-Breite	Merkmal A+ / A- Abb. 2-17 / 2-23
Fehlendes Spätholz: sehr starke Reduktion von SH eines Jahrringes (N) / in 2-5 folgenden (N+)	Merkmal N / N+ Abb. 2-18 / 2-24
Schmale FH-Tracheen: stark verminderte Querschnittsflächen der FH-Tracheen	Merkmal SEV Abb. 2-19 / 2-25
Traumatisch vergrößerte SH-Tracheen: stark vergrößerte Querschnittsflächen der SH-Tracheen, bandartig im SH	Merkmal G Abb. 2-20 / 2-26
Lokale Verletzungen: Verletzung mit Uberwallungszone im FH- oder SH-Bereich („Scar")	Merkmal V Abb. 2-27
Merkmalskombination C & N: Kombination von Merkmal C und Merkmal N, wird als Merkmal C gewertet	Merkmal C Abb. 2-21
Merkmalskombination F & T: Kombination von Merkmal F und Merkmal T, wird als Merkmal F gewertet	Merkmal F Abb. 2-15

Kapitel 3 Ergebnisse

Bevor im Ergebnisteil die holzanatomischen Untersuchungen vorgestellt werden, sollen Ergebnisse zur Homogenität (EPS) verschiedener holzanatomischer Variablen,Fern-korrelationen zwischen Rezent-Standorten, deren Alterstrend-Verlauf sowie die Klima-Wuchsbeziehungen dargelegt werden. Darauf folgend werden die Ergebnisse der Simulationen von abiotischen und biotischen Umweltereignissen, die im Rahmen eines Eichen-Experiments durchgeführt worden sind, aufgeführt; diese Experimente wurden von Dendrometer-Messungen begleitet (Verifikationsphase). Umweltereignisse, die zu Veränderungen in der Holzanatomie führen, sind zusätzlich an rezenten Eichen auf verschiedenen Standorten Süddeutschlands untersucht worden („Rezent-Studie“); es werden lokale, regionale und überregionale Weiserjahre abgeleitet. Danach folgt eine Zwischenbilanz, in der holzanatomische Anomalien bzw. Variablen und deren Eindeutigkeit hinsichtlich der auslösenden Umweltereignisse beurteilt sind. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der Anwendung der zuvor erarbeiteten Ergebnisse. Hierin werden Umweltereignisse mittels zugehöriger Veränderungen in der Holzanatomie an subfossilen Eichen der HOC Hohenheim datiert, die eine 130-jährige und eine 1.000-jährigen Periode umspannen („Subfossil-Studie“).

3.1 Expressed Population Signal (EPS)

Das Expressed Population Signal gibt an, ob die Stichprobe (Anzahl der Bäume pro Standort) als repräsentativ für den gesamten Standort (Grundgesamtheit) anzusehen ist. Aussagen über Sensitivitäten von Jahrringparametern bezüglich klimatischen Parametern sind demzufolge nur bei EPS-Werten ≥ 0,85 zulässig bzw. statistisch abgesichert (Wigley et al., 1984). Das EPS der „klassischen“ Jahrringparameter (Gesamtring (RW)-, Spätholz (SH)- und Frühholzbreite (FH)) sowie der Frühholz-Parameter (mittlere Gefäßfläche der Frühholz-Tracheen (MVA), mediane Gefäßfläche der 5 größten Frühholz-Tracheen aus der ersten Frühholz-Reihe (MVA5), absolute Leitquerschittsfläche der Frühholz-Tracheen (CAabs)) ist im Folgenden für die Rezent-Studie aufgezeigt.

3.1.1 Expressed Population Signal von Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite

In Abbildung 3-1 ist exemplarisch dargestellt, wie die EPS-Werte im berechneten Zeitfenster für Gesamtringbreite (RW), Spätholzbreite (SH) und Frühholzbreite (FH) der untersuchten Bäume am Standort Leimersheim (Rhein) verlaufen.

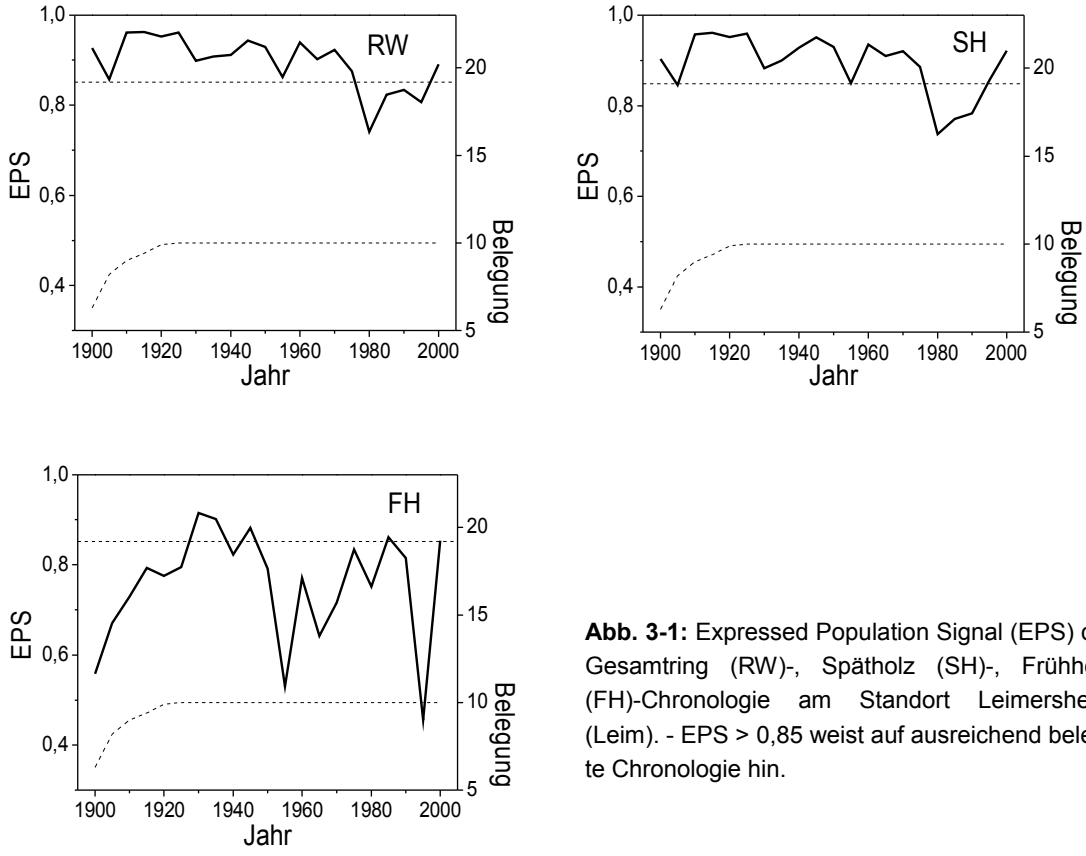


Abb. 3-1: Expressed Population Signal (EPS) der Gesamtring (RW)-, Spätholz (SH)-, Frühholz (FH)-Chronologie am Standort Leimersheim (Leim). - EPS > 0,85 weist auf ausreichend belegte Chronologie hin.

Den Grafiken in Abbildung 3-1 ist deutlich zu entnehmen, dass das EPS für RW und SH nahezu gleich verläuft und nur in den Jahren 1980-2000 unter 0,85 fällt; die Belegung am Standort reicht demnach aus, um repräsentative Studien durchzuführen. Hingegen übersteigen die EPS-Werte für FH den Wert 0,85 nur selten (z.B. 1930-1940); die Belegung am Standort reicht demnach meist nicht für repräsentative Studien.

Die Repräsentanz der untersuchten Standortschronologien von Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite fällt sehr unterschiedlich aus. Ab einer Belegung von 6 Bäumen übersteigt das EPS der Gesamtring- und Spätholz-Chronologien nahezu ständig den geforderten Wert von 0,85 im berechneten Zeitfenster; bei Belegungen unter 6 Bäumen wird der Wert meist nicht erreicht. Es konnte nur ein geringer Unterschied zwischen dem EPS von Gesamtring- und Spätholz-Chronologie eines Standortes festgestellt werden (siehe exemplarisch Abb. 3-1). Gesamtring- und Spätholz-Chronologien der Standorte Au1, Au3, Lampertheim5, Lampertheim8, Wertheim1, Fahr, Riedlingen2 sind nicht oder unzureichend repräsentativ – das EPS liegt im berechneten Zeitintervall meist unter 0,85.

Die Belegungen der Frühholz-Chronologien reichen nicht aus, um auf die Grundgesamtheit an den Standorten zu schließen. Das EPS überschreitet längerfristig nicht den geforderten Wert (siehe exemplarisch Abb. 3-1). Ausnahme bildet der Standort Plieningen; ab einer Belegung von 20 Bäumen werden konstant Werte größer 0,85 erreicht.

3.1.2 Expressed Population Signal der Frühholz-Variablen

Die einzelnen Frühholz-Variablen sind für die jeweiligen Flusstäler zu Regional-Chronologien zusammengefasst worden. Die EPS-Werte der holzanatomischen Frühholz(FH)-Variablen mittlere Gefäßfläche der Frühholz-Tracheen (MVA), mediane Gefäßfläche der 5 größten Tracheen aus der ersten Frühholz-Reihe (MVA5) sowie die absolute Leitquerschittsfläche der Frühholz-Tracheen (CAabs) zeigt Abbildung 3-2.

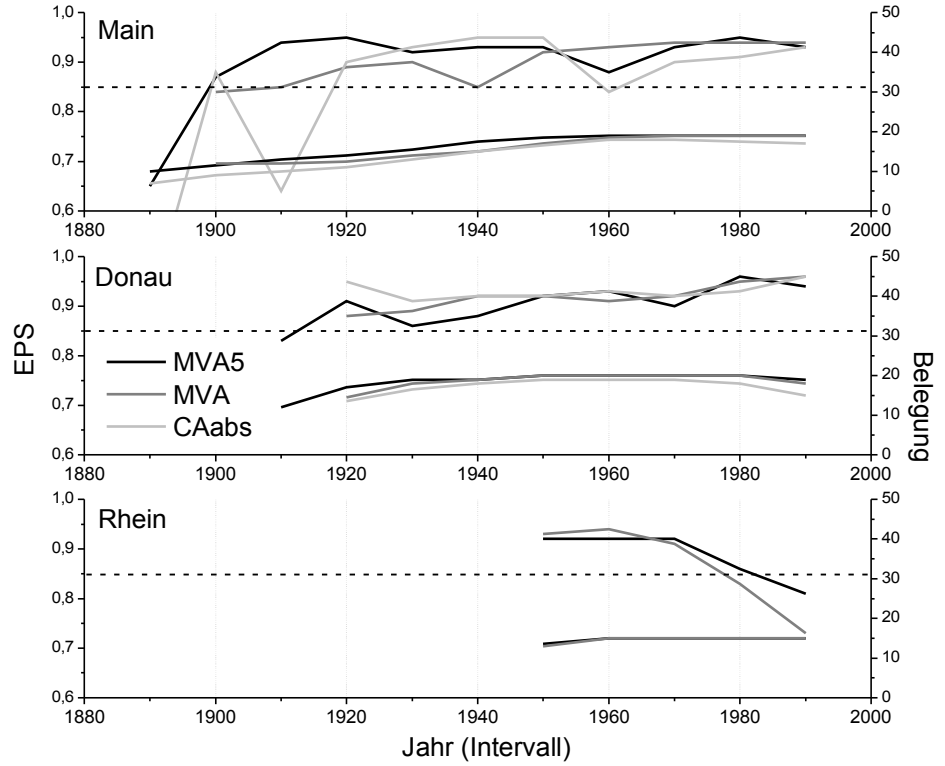


Abb. 3-2: Expressed Population Signal (EPS) der Frühholz(FH)-Parameter mittlere Gefäßfläche der FH-Tracheen (MVA), mediane Gefäßfläche der 5 größten FH-Tracheen aus der ersten FH-Reihe (MVA5) sowie die absolute Leitquerschittsfläche der FH-Tracheen (CAabs) aus dem Maintal, Donautal und Rheintal. - EPS > 0,85 weist auf ausreichend belegte Chronologie hin, Belegung = Anzahl an Eichen.

Die Anzahl an Eichen (Belegung), aus der die jeweilige Chronologie für den Main und Donau erstellt ist, reicht aus um auf die Grundgesamtheit zu schließen. Für den Rhein steht CAabs nicht zur Verfügung, da bei den bildanalytischen Messungen von Blanchard (2008) dieser FH-Parameter nicht aufgenommen worden ist.

Die Anzahl der Bäume aus dem Main- und Donautal (für die FH-Parameter MVA, MVA5 und CAabs) reicht aus, um weitere Ergebnisse (z.B. Klima-Wuchsbeziehungen) statistisch gesichert interpretieren zu dürfen. Für die Bäume aus dem Rheintal und deren FH-Parameter MVA und MVA5 ist dies, wenn überhaupt, nur für einen sehr enges Zeitfenster möglich.

3.2 Fernkorrelation zwischen den rezenten Jahrringchronologien

Der t-Wert nach Hollstein (t-Wert$_{Hollstein}$) ist ein Maß für die Ähnlichkeit (Synchronlage) zweier Jahrringkurven; ein t-Wert größer 5 gilt als signifikant.

Abbildung 3-3 zeigt die Fernkorrelation zwischen allen Gesamtring-Chronologien (RW), den Spätholz-Chronologien (SH) und den Frühholz-Chronologien (FH) in Abhängigkeit zur Entfernung (Distanz in km) der Standorte zueinander.

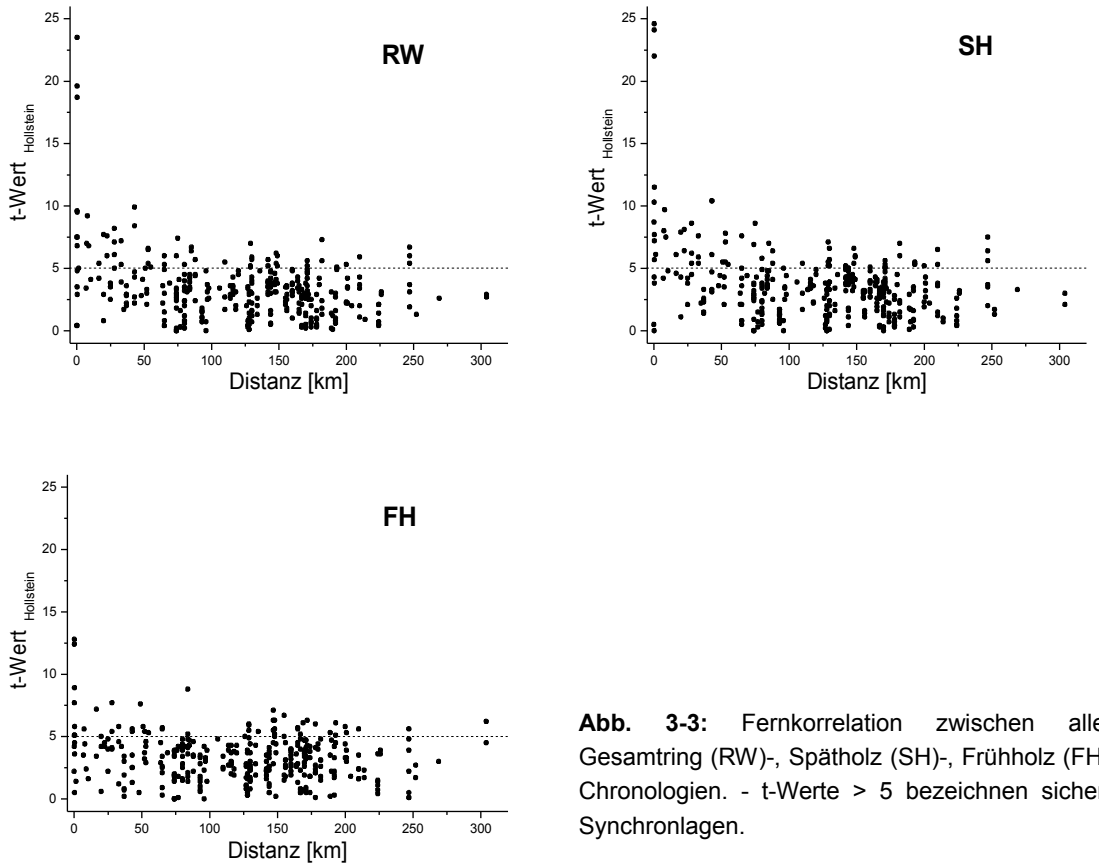


Abb. 3-3: Fernkorrelation zwischen allen Gesamtring (RW)-, Spätholz (SH)-, Frühholz (FH)-Chronologien. - t-Werte > 5 bezeichnen sichere Synchronlagen.

Die Fernkorrelationen (t-Wert$_{Hollstein}$) zwischen den Gesamtring-Chronologien bzw. den Spätholz-Chronologien nehmen allgemein mit einer Distanz unter 100 km zu; Gesamtring-Chronologien und Spätholz-Chronologien verhalten sich nahezu gleich. Die Frühholz-Chronologien zeigen über alle Distanzen hinweg vergleichbare Synchronlagen.

Um Ergebnisse der Klima-Wuchsbeziehungen (siehe Kapitel 3.4) hinsichtlich regionaler und überregionaler Signale der Gesamtring-, Spätholz- und Frühholz-Chronologien besser interpretieren zu können, ist die Kenntnis über Synchronlagen von großer Bedeutung.

Bei Entfernungen unter 50 km steigt der $t\text{-Wert}_{Hollstein}$ vereinzelt auf über 10 an; 51 Prozent der Spätholz-Chronologien, 47 Prozent der Gesamtring-Chronologien und 31 Prozent der Frühholz-Chronologien weisen bei einer Entfernung unter 50 km signifikante Synchronlagen auf – unabhängig von der geographischen Lage. Die t-Werte der Spätholz-Chronologien liegen hier geringfügig höher als die der Gesamtring-Chronologien.

Signifikante Synchronlagen zwischen Frühholz-Chronologien treten im Einzellfall bis zu Entfernungen von 300 km auf. Spätholz und Frühholz-Chronologien weisen zwischen einer Distanz von 100 bis 300 km mehr t-Werte größer 5 auf, als die Gesamtring-Chronologien (Anzahl SH=30; Anzahl FH=27; Anzahl RW=20).

Der maximale t-Wert liegt bei 24,6 für LW, 23,5 für RW und 12,8 für EW. Sinkt die Entfernung der Standorte unter 2 km, zeigen 71 Prozent der Spätholz-Chronologien t-Werte > 5; Gesamtring- und Frühholz-Chronologien: 64 und 57 Prozent.

Im folgenden soll auf die Fernkorrelation zwischen den Spätholz-Chronologien an Rhein, Main und Donau genauer eingegangen werden. Abbildung 3-4 verdeutlicht die Ergebnisse.

Zwischen den Spätholz-Chronologien der Main-Standorte besteht eine starke Fernkorrelation. Vergleicht man die t-Werte der 9 Chronologien am Main, so zeigen die Spätholz-Chronologien der Standorte Baunach (Bestandesalter 51 a) und Wertheim1 (Bestandesalter 30 a) keine signifikanten Synchronlagen mit den übrigen Spätholz-Chronologien (Ausnahme: Baunach verglichen mit Dettelbach); im Vergleich zu den Spätholz-Chronologien der Standorte mit einem Bestandesalter von > 60 Jahre lässt der Zuwachsverlauf untereinander äußerst gesicherte Synchronlagen erkennen - unabhängig der Standorteigenschaften. Die Spätholz-Chronologie des Standortes Fahr (Bestandesalter 37 a) zeigt weitestgehend gute Synchronlagen mit den übrigen Spätholz-Chronologien. Synchronlagen zwischen Beständen mit einem Alter größer 100 Jahre zeigen am Main deutlich höhere t-Werte.

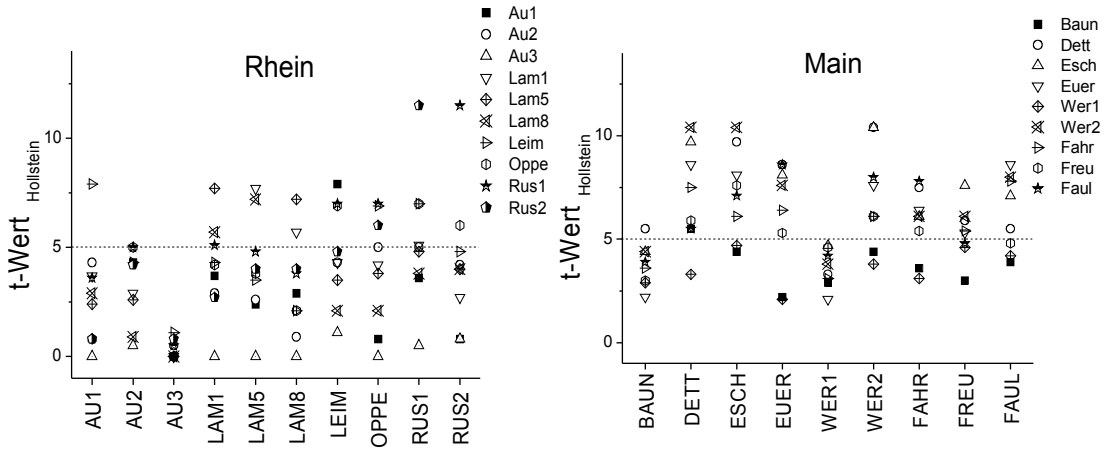


Abb. 3-4: Fernkorrelation der Spätholz-Chronologien der Standorte zueinander an Rhein (**links**) und Main (**rechts**). - t-Werte > 5 bezeichnen sichere Synchronlagen. (Abkürzungen der Standortsnamen siehe Tabelle im Anhang)

Die 10 Spätholz-Chronologien der Rhein-Standorte lassen eine weniger homogene Fernkorrelation untereinander erkennen. Rhein-Standorte mit einem geringen mittleren Alter weisen tendenziell schlechtere Synchronlagen zu anderen Standorts-Chronologien auf (z.B. Au3: mittleres Alter 16 a). Wie schon am Main, wenn auch am Rhein heterogener, zeigen die Spätholz-Chronologien mit einem mittleren Alter über 100 Jahre weit bessere Synchronlagen zueinander.

Erstellt man mit allen Spätholzbreiten-Messungen eines Gebiets eine sogenannte Master-Chronologie (z.B. alle untersuchten Bäume am Fluss Main), können diese hinsichtlich deren Verlauf verglichen werden. Signifikante Synchronlagen lassen sich zwischen den Master-Chronologien des Rheins, des Mains und der Donau für die letzten 120 Jahr nicht erkennen (t-Werte < 5). Der t-Wert der Spätholz-Chronologien zwischen Rhein und Donau weist mit 4,6 eine höhere Synchronlage auf als die t-Werte zwischen den Chronologien von Main und Donau (t-Wert=0,8) bzw. Rhein und Main (t-Wert=0,5).

Indessen liegen die t-Werte der Master-Chronologien der Frühholz-Chronologien zwischen Rhein, Main und Donau über 5. Der t-Wert der Master-Chronologien der Frühholzbreiten zwischen Rhein und Main ist mit 10,1 signifikant hoch. Aber auch die

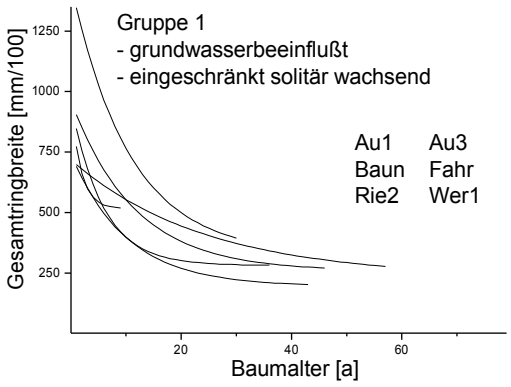
Master-Chronologien zwischen Main und Donau (t-Wert=7,6) bzw. Rhein und Donau (t-Wert=5,2) zeigen statistisch gesicherte Synchronlagen.

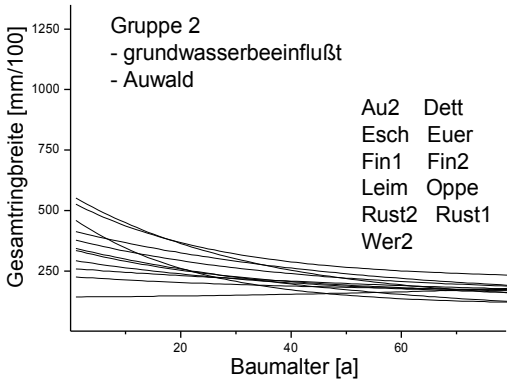
Aus den obigen Abschnitten geht deutlich hervor, dass die Synchronlage zwischen zwei Jahrringkurven distanzabhängig und altersabhängig ist. Ebenso hängt eine Synchronlage davon ab, welche Jahrringparameter (Gesamtring/Spätholz bzw. Frühholz) der Untersuchung zu Grunde liegen.

3.3 Alterstrend-Verlauf (Juveniltrend) an den rezenten Standorten

Um möglichst umfassende Rückschlüsse hinsichtlich der Wachstumsreaktionen der Bäume ziehen zu können, folgen die Ergebnisse über die Untersuchungen zum Alterstrend-Verlauf an den jeweiligen Standorten. Abbildung 3-5 zeigt den Alterstrend-Verlauf der Gesamtringbreiten-Chronologien an den untersuchten Rezent-Standorten.

Die Bäume weisen abhängig von Wasserversorgung und Lichtverhältnis einen charakteristischen Zuwachsverlauf auf: Standorte mit optimaler Wasserversorgung und idealen Lichtverhältnissen zeigen einen sehr ausgeprägten Trendverlauf mit maximalen Zuwächsen (Kulminationspunkt) von 6,9 mm bis über 12,5 mm (Gruppe1). 20 bis 40 Jahre nach Erreichen des Kulminationspunktes sinkt das Wachstum auf ein Niveau von 2,2 mm bis 3,9 mm ab. Die maximalen Zuwächse der Eichen stark grundwasserbeeinflußter Standorte mit Auwald-Charakter (Gruppe 2) liegen mit 1,4 mm bis 5,5 mm am Kulminationspunkt deutlich niedriger. Ein stabiles Zuwachsniveau wird zwar erst circa 40 Jahre nach dem Kulminationspunkt erreicht, dennoch ist der Trendverlauf deutlich schwächer ausgeprägt. Bäume trockener bis mittelfeuchter Standorte (Gruppe 3) zeigen einen stark unterdrückten Juveniltrend. Die maximalen Zuwächse liegen mit 0,7 mm bis 4,3 mm auf einem besonders tiefen Niveau. Dieses tiefe Niveau bleibt im weiteren Verlauf erhalten bzw. sinkt noch weiter ab. Die Alterstrends auf den Standorten Faulbach und Dettelbach bilden eine Ausnahme: Der Alterstrend-Verlauf am Standort Faulbach weist Charakteristika der Gruppe 2 auf (aufgrund der Standort-Verhältnisse in Gruppe 3 eingeordnet), der Alterstrend-Verlauf am Standort Dettelbach Charakteristika der Gruppe 3 (aufgrund der Standort-Verhältnisse in Gruppe 2 eingeordnet).





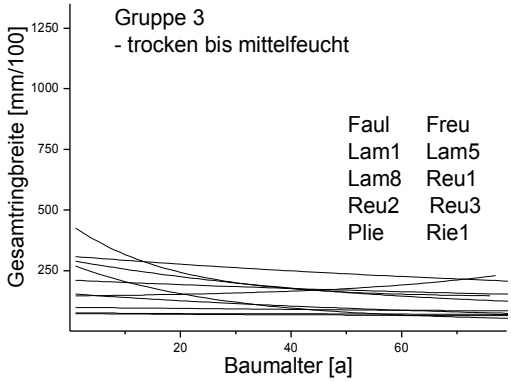


Abb. 3-5: Alterstrend-Verlauf der Gesamtringbreiten-Chronologien (absolute Breiten) der untersuchten Standorte. Gruppe1: grundwasserbeeinflußt, eingeschränkt solitär wachsend; Gruppe2: grundwasserbeeinflußt, Auwald; Gruppe3: trocken bis mittelfeucht.

Die Untersuchung zeigt deutlich unterschiedliche Alterstrend-Verläufe je nach Wasserversorgung bzw. Bodenfeuchte an den Standorten; Ausnahmen finden sich selten.

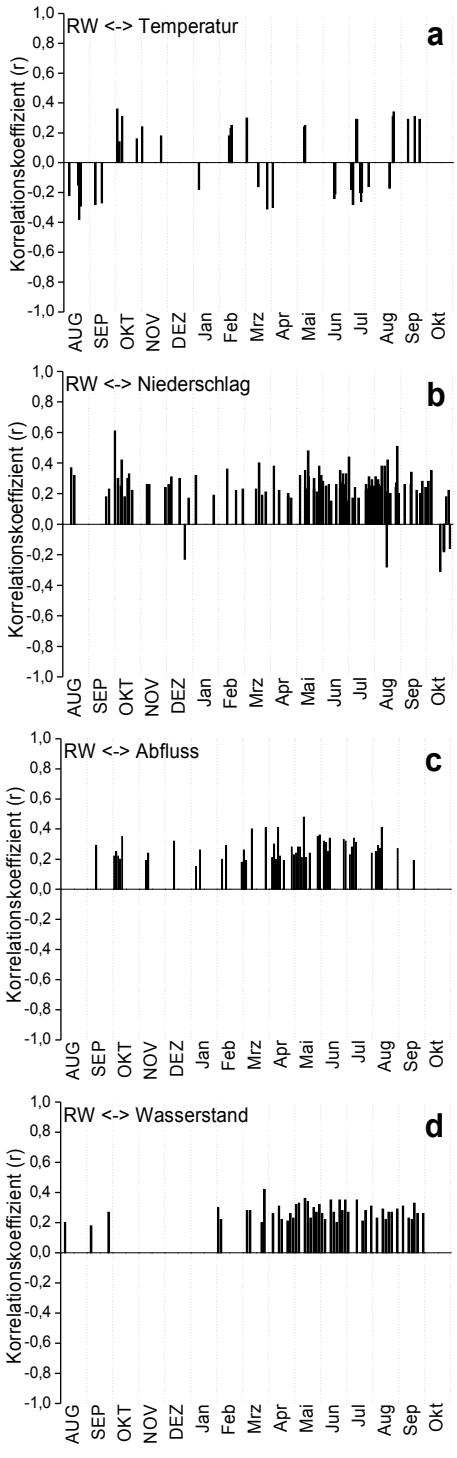


Abb. 3-6: Korrelationsberechnungen zwischen Gesamtringbreiten-Chronologien (RW) und Monatsmittel-Temperatur **(a)**, monatliche Niederschlagssumme **(b)**, mittlerer monatlicher Abfluss **(c)** und mittlerer monatlicher Wasserstand **(d)** aller Standorte von Vorjahr-August (AUG) bis Oktober (Okt) des laufenden Jahres. Aufgeführt sind ausschließlich signifikante Zusammenhänge.

3.4 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klima- und den Jahrring-Parametern Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite rezenter Eichen

Die nächsten Abschnitte befassen sich mit der Frage, welchen Einfluss klimatische Parameter wie Monatsmittel-Temperatur, monatliche Niederschlagssumme, mittlerer monatlicher Abfluss und mittlerer monatlicher Wasserstand auf das Ringbreiten-Wachstum ausüben. Begonnen wird mit den Klima-Wuchsbeziehungen der Gesamtringbreite, worauf die der Spätholz- und der Frühholzbreite folgt.

3.4.1 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klimaparametern und der Gesamtringbreite rezenter Eichen

„Klassische“ Berechnungen von Klima-Wuchsbeziehungen geben Hinweise auf die Sensitivität der Bäume zum vorherrschenden Klima am Standort. Diese Untersuchungen geben Aufschluss darüber, welche abiotischen Klimafaktoren das Jahrringwachstum der Eichen am Standort beeinflussen.

Abbildung 3-6 zeigt die Ergebnisse aus den linearen Korrelationsberechnungen der Klima-Wuchsbeziehungen, ermittelt

für die Gesamtringbreiten-Chronologien (RW) aller Standorte. Es ergeben sich in besonders hohem Maße signifikante Korrelationswerte mit den Klimaparametern monatliche Niederschlagssumme, mittlere monatliche Abflussmenge und mittlerer monatlicher Wasserstand; mit sehr wenigen Ausnahmen treten zum Faktor „Wasser“ nur positive Zusammenhänge auf. Signifikante Zusammenhänge zwischen Gesamtringbreiten-Chronologien und Monatsmittel-Temperaturen (Abb. 3-6a) können nur vereinzelt festgestellt werden und sind sowohl positiv als auch negativ. Über dreiviertel der Gesamtringbreiten-Chronologien weisen - mit steigender monatlicher Niederschlagssumme (Abb. 3-6b) im Vorjahres-Oktober und von Mai bis September – hohe statistische Zusammenhänge auf; in den Monaten Mai bis Juli sogar vermehrt. Der Gesamtringbreiten-Zuwachs von ca. 90 Prozent der flussnahen Standorte ist nachweisbar stark positiv von gesteigertem Abfluss bzw. Wasserstand beeinflusst (Abb. 3-6c, d). Die Gesamtringbreite am Standort Gundremmingen 2 weist als einziger flussnaher Standort keinen statistisch gesicherten Zuwachs mit steigendem Niederschlag bzw. Abfluss auf. Die Anzahl und die Stärke der positiven Korrelationen zwischen der Gesamtringbreite und dem Wasserstand bzw. dem Abfluss ist besonders hervorzuheben. Die Berechnungen sind ausschließlich mit flussnahen Standortschronologien (n=16) durchgeführt.

Abbildung 3-7 verdeutlicht diesen Effekt. Die Korrelationsberechnungen zeigen in fast allen Monaten zwischen April bis September einen statistisch signifikanten Gesamtringbreiten-Zuwachs bei gesteigertem Abfluss; der Einfluss des Niederschlags fällt etwas geringer aus. Die Donau-Standorte Gundremmingen 1 (Fin1) und Gundremmingen 2 (Fin2) nehmen eine Sonderstellung ein: Korrelationen treten wesentlich weniger auf.

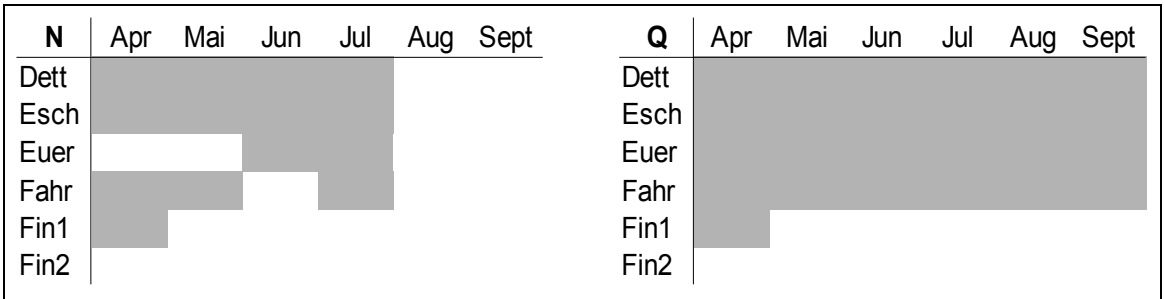


Abb. 3-7: Signifikant positive Korrelationen (grau) zwischen Gesamtringbreiten-Chronologien und monatliche Niederschlagssumme (N, **links**) bzw. mittlerer monatlicher Abfluss (Q, **rechts**) an einigen Auwald-Standorten.

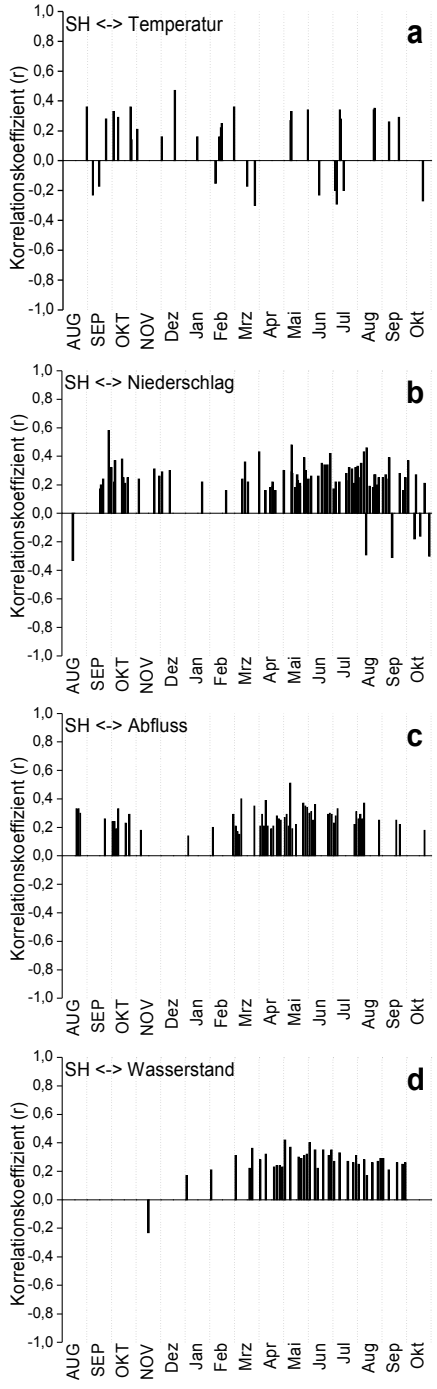


Abb. 3-8: Korrelationsberechnungen zwischen Spätholzbreiten-Chronologien (SH) und Monatsmittel-Temperatur **(a)**, monatliche Niederschlagssumme **(b)**, mittlerer monatlicher Abfluss **(c)** und mittlerer monatlicher Wasserstand **(d)** aller Standorte von Vorjahr-August (AUG) bis Oktober (Okt) des laufenden Jahres. Aufgeführt sind ausschließlich signifikante Zusammenhänge.

3.4.2 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klimaparametern und der Spätholzbreite rezenter Eichen

Die Berechnungen der Klima-Wuchsbeziehungen von der Gesamtringbreite zu denen der Spätholzbreite ergeben ein sehr ähnlich Bild; es wird daher nur auf deutliche Unterschiede eingegangen. Abbildung 3-8 zeigt die statistisch signifikanten Zusammenhänge zwischen den Klimaparametern Monatsmittel-Temperatur, monatliche Niederschlagssumme, mittlerer monatlicher Abfluss und mittlerer monatlicher Wasserstand und den Spätholzbreiten-Chronologien (SH).

Die Korrelationswerte liegen meist geringfügig höher als bei den Gesamtringbreiten-Chronologien. Der Spätholzbreiten-Zuwachs steigt ausnahmslos bei allen untersuchten flussnahen Standorten mit zunehmender Abflussrate bzw. steigendem Wasserstand (Abb. 3-8c, d) in den Monaten April bis September an.

Die Anzahl an signifikanten Korrelationen zwischen den Spätholzbreiten-Chronologien und den Klimaparametern aus den Vorjahres- und Wintermonaten fallen geringer aus als bei den Berechnungen über die Gesamtringbreite.

Der positive Zusammenhang zwischen dem Zuwachs der Spätholzbreite und dem Abfluss bzw. dem Wasserstand darf auch hier nicht unerwähnt bleiben.

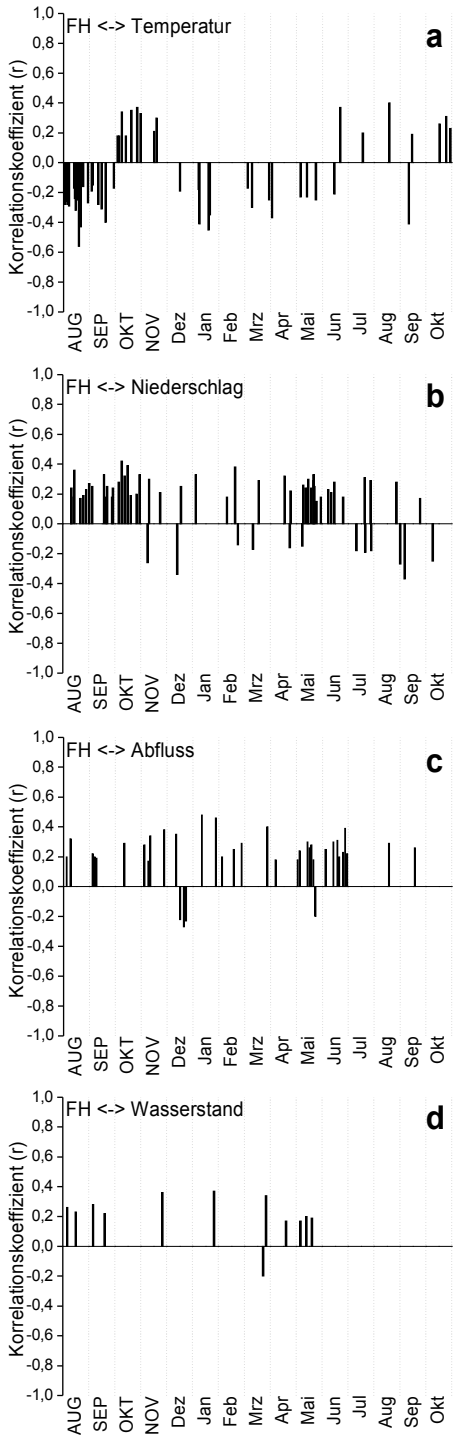


Abb. 3-9: Korrelationsberechnungen zwischen Frühholzbreiten-Chronologien (FH) und Monatsmittel-Temperatur **(a)**, monatliche Niederschlagssumme **(b)**, mittlerer monatlicher Abfluss **(c)** und mittlerer monatlicher Wasserstand **(d)** aller Standorte von Vorjahr-August (AUG) bis Oktober (Okt) des laufenden Jahres. Aufgeführt sind ausschließlich signifikante Zusammenhänge.

3.4.3 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen Klimaparametern und der Frühholzbreite rezenter Eichen

Die Berechnungen des „Expressed Population Signal“ (EPS) in Kapitel 3.1 hat gezeigt, dass die Belegung der Frühholzbreiten-Chronologien nur in wenigen Fällen ausreicht, um aussagekräftige Analysen zu betreiben; der Vollständigkeit halber werden mit Vorbehalt die Zusammenhänge zu den Klimaparametern gezeigt.

Der Frühholzbreiten-Zuwachs (FH) lässt sich weniger gut mit Klimaparametern in Verbindung setzen; Abbildung 3-9 gibt Aufschluss darüber.

Die Anzahl der signifikanten Beziehungen zwischen den Frühholzbreiten zum Abfluss und zum Wasserstand (Abb. 3-9c, d) fällt deutlich geringer aus. Hohe Niederschläge von Vorjahres-August bis Vorjahres-Oktober steuern das Wachstum des Frühholzes durch Reservestoffbildung signifikant positiv (Abb. 3-9b). Dies tritt bei den Klima-Wuchsberechnungen von Gesamtring- und Spätholzbreite nicht in Erscheinung.

Hohe Temperaturen im Vorjahres-August und Vorjahres-September führen zu einer schmaleren und hohe Temperaturen im Vorjahres-Oktober zu einem gesteigerten Zuwachs in der Frühholzbreite (Abb. 3-9a). Bei der Hälfte der Frühholz-Chronologien zeigt sich dieser Effekt; bei den Gesamtring- und Spätholzbreiten-Chronologien liegt dieser Einfluss nur bei 19 bzw. 9 Prozent vor.

3.4.4 Intervall-Korrelationen zu Klima-Wuchsbeziehungen über den Vergleichszeitraum

Um zu überprüfen, ob Korrelationen zwischen Standortschronologien und Klimaparametern stetig, von der Jugendphase bis hin zur Altersphase der Bäume, vorliegen, sind in DendroClim (Biondi und Waikul, 2004) für die Spätholz- und Frühholzbreiten-Chronologien Intervall-Korrelationen berechnet worden (30-jährige Intervall-Länge). Da die Ergebnisse der Klima-Wuchsberechnungen für Gesamtring und Spätholz sehr ähnlich ausfallen (siehe Kapitel 3.4), wird in diesem Abschnitt auf die Darstellung der Gesamtringbreiten verzichtet. Abbildung 3-10 zeigt exemplarisch das Ergebnis für den Standort Euerheim/Main.

Aus Abbildung 3-10 ist ein allgemein auftretender Effekt zu entnehmen: signifikante Korrelationen treten in einzelnen Monaten weitestgehend über die gesamte Länge einer Chronologie auf und schließen sowohl Jugendphase als auch Altersphase der Bäume ein. Konkret zeigt sich in dieser Abbildung ein fast durchgängig stark positiver Zusammenhang (grün) zwischen den Spätholzbreiten (Abb. 3-10 oben) des Standortes Euerheim/Main und den Abflussdaten im Monat Juli am Pegel Schweinfurt; ab 1925 kommen signifikante Korrelationen in den Monaten Juni und August hinzu, während die des Juli abnehmen.

Im Falle der Frühholzbreiten lässt sich aus der Abbildung (Abb. 3-10 unten) entnehmen, dass auch hier ein stetiger Zusammenhang mit den Abflussdaten in den Monaten Vorjahres-August und September über weite Teile des Vergleichszeitraumes besteht; unter Beachtung, dass die EPS-Werte eine sichere statistische Aussage nur unter Vorbehalt zulassen.

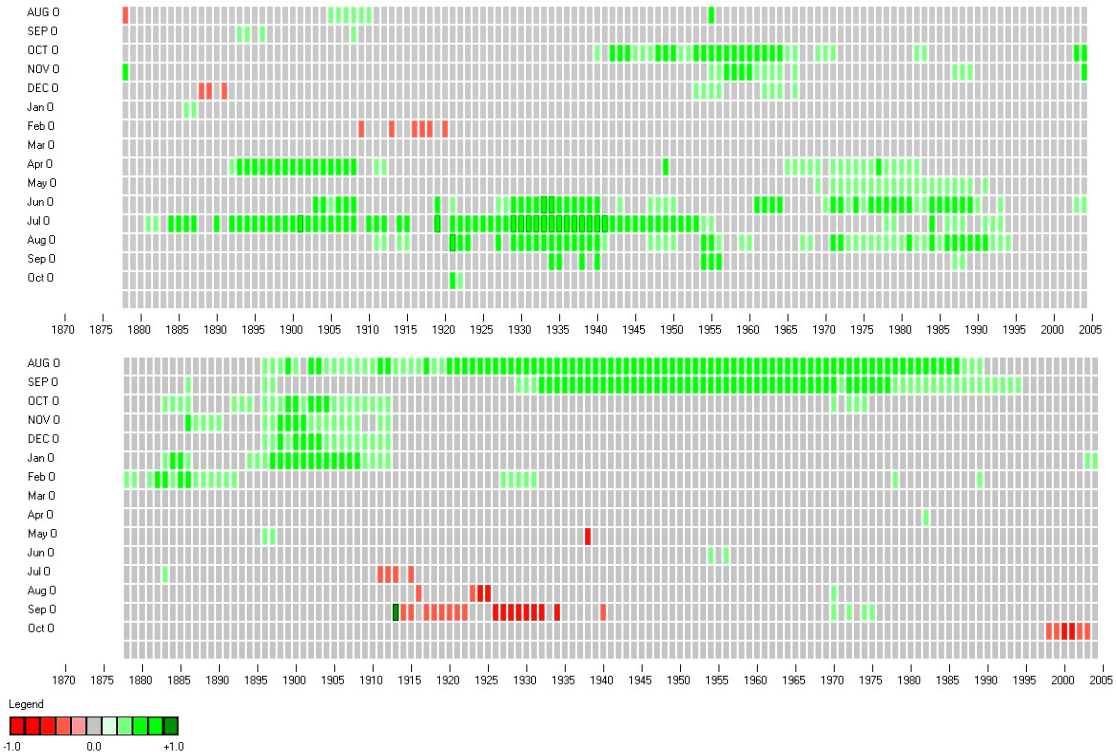


Abb. 3-10: Beispiel einer Intervall-Korrelation zwischen Spätholzbreiten-Chronologie einerseits (oben) und Frühholzbreiten-Chronologie andererseits (unten), beide am Standort Euerheim/Main und den monatlichen Abflussdaten (Pegel Schweinfurt) des Zeitraumes 1878 bis 2004. Berechnungen von Vorjahres-August (AUG) bis Oktober (Oct) des laufenden Jahres in einem gleitendem 30-jährigen Zeitintervall. - Gezeigt sind ausschließlich signifikante Werte (Farben siehe Legenden-Balken).

Bezüglich der ausgewerteten Chronologien kann festgehalten werden, dass signifikante Klima-Wuchsbeziehungen über sehr lange Zeiträume bestehen und sich nur sehr geringe Unterschiede in Jugend- und Altersphase bezüglich der Sensitivität gegenüber den Klimaparametern zeigen.

3.5 Einfluss von Klima und Witterung auf ausgewählte holzanatomische Frühholz-Variablen rezenter Eichen

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Einfluss von Klima und Witterung auf die Ausprägung verschiedener holzanatomischer Frühholz-Variablen (FH-Variablen) untersucht. In der Auswertungsphase zeigte sich für die holzanatomischen Frühholz-Variablen mittlere Frühholz-Gefäßfläche (MVA), mediane Frühholz-Gefäßfläche der fünf größten Tracheen der ersten Frühholz-Reihe (MVA5) und absolute Frühholz-Leitquerschnittsfläche (CAabs) eine besondere Sensitivität gegenüber Klima und Witterung. „Klima“ soll hier als Ausprägung der Parameter (z.B. Temperatur) über einen langen Zeitraum (Jahre) und „Witterung“ als Ausprägung über einen kurzen Zeitraum (Tage bis Wochen) gesehen werden.

Diese holzanatomischen Frühholz-Variablen sind mit langjährigen Klimazeitreihen verglichen worden (kontinuierliche Klima-Wuchsbeziehungen). Die nicht-kontinuierliche Klima-Wuchsanalyse zwischen klimatischen Einzelereignissen (z.B. tiefe Winterfröste) und FH-Variablen sind ebenfalls Teil der folgenden Abschnitte.

Bevor diese Ergebnisse vorgestellt werden, wird auf die Chronologie-Synchronität untereinander für die Frühholz-Variablen eingegangen.

3.5.1 Synchronität der Chronologien von holzanatomischen Frühholz-Variablen zwischen den untersuchten Regionen an Main, Rhein und Donau

Die bildanalytischen Messungen der Frühholz-Variablen (hier: MVA, MVA5 und CAabs) werden zu sog. „Master-Chronologien“ zusammen gefasst, daraus folgt je eine Chronologie für die Region Main, Rhein und Donau. Exemplarisch zeigt Abbildung 3-11 die Verläufe der MVA5-Chronologien aus den Regionen Main, Rhein und Donau, da sich hier starke Zusammenhänge zwischen den Bäumen der Regionen zeigen. Alle diesbezüglich weiteren Diagramme finden sich im Anhang dieser Arbeit.

Der niederfrequente Synchronverlauf der MVA5-Chronologien der Regionen Main, Donau und Rhein ist unverkennbar hoch. Die Indizes der zwei MVA5-Chronologien steigen – nach einem gemeinsamen Minimum um das Jahr 1912 – an und erreichen alle um das Jahr 1960 Höhepunkte, bevor sie bis zum Ende hin erneut abfallen.

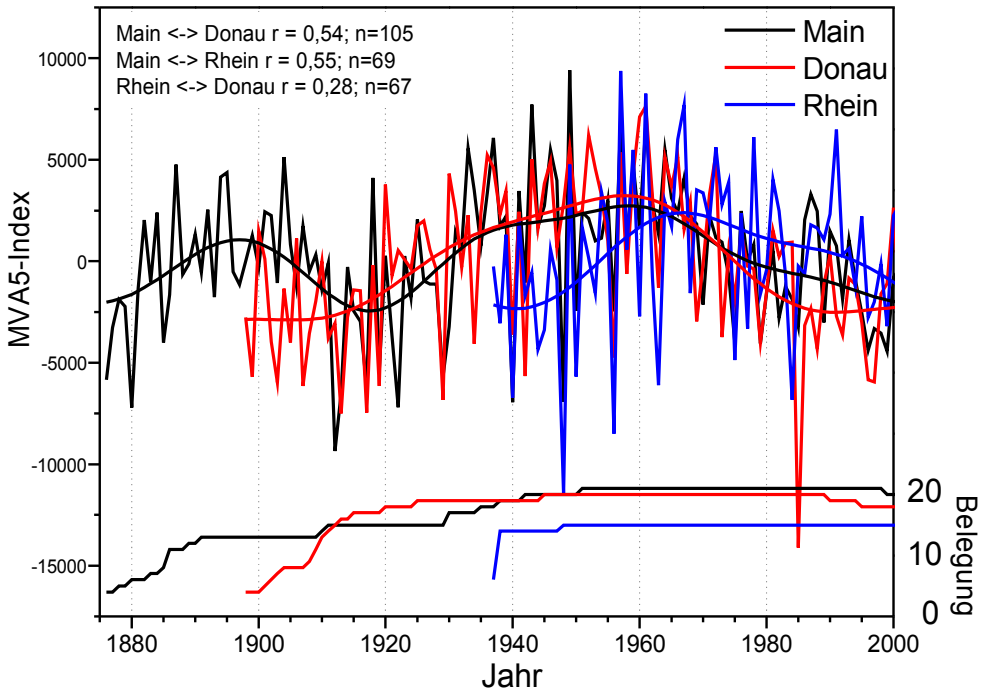


Abb. 3-11: Verläufe der standardisierten MVA5-Chronologien von Main (schwarz), Donau (rot) und Rhein (blau). Hoch- und niederfrequenten synchronen Verläufe aller drei Master-Chronologien sind sehr gut zu erkennen. Die angegebenen Zusammenhänge (Korrelationskoeffizienten r) beziehen sich auf die hochfrequenten Zeitreihen. - r = Korrelationskoeffizient; n = Anzahl der verglichenen Jahre; negative Werte = kleinere mediane FH-Querschnittsfläche; positive Werte = größere mediane FH-Querschnittsfläche; Glättung durch Fast Fourier-Transformation im 11-jährigen Fenster.

Weitere Gemeinsamkeiten zwischen den MVA5-Chronologien spiegeln sich im hochfrequenten Signal wider. In den Zeiträumen von 1912-1920, 1948-1950 und 1955-1964 herrscht sehr hohe Synchronität. Geringe Querschnittsflächen der FH-Tracheen in der ersten Frühholzreihe (stark negative Index-Werte), wie in den Jahren 1940, 1948, 1956 und 1968, sind in allen drei MVA5-Chronologien deutlich ausgeprägt.

Vergleicht man den Verlauf der MVA- mit den MVA5-Chronologien, so fällt ein sehr hoher Zusammenhang auf. Der Korrelationskoeffizient zwischen den MVA- und MVA5-Chronologien beträgt an Donau r = 0,89 (n=100), Rhein r = 0,84 (n=69) und Main r = 0,74 (n=126). Die Korrelation zwischen CAabs- und MVA5-Chronologie am Main ist mit r = 0,47

(n=128) bzw. an Donau mit r = 0,63 (n=99) viel geringer. Die Korrelationen zwischen CAabs- und MVA-Chronologie an Main (r = 0,23; n=125) und Donau (r = 0,44; n=99) zeigen noch geringere Korrelationskoeffizienten (weitere Korrelationswerte und Synchronverläufe anderer FH-Variablen können aus dem Anhang auf Seite 201 entnommen werden), dennoch sind alle signifikant.

Die Chronologien der FH-Variablen MVA5 und MVA zeigen somit – für die jeweiligen Regionen untereinander – hohe statistische Zusammenhänge. Die Chronologien der FH-Variablen MVA5 und MVA zwischen Rhein, Main und Donau weisen sehr synchrone niederfrequente Verläufe auf; Synchronität im hochfrequenten Verlauf herrscht in einzelnen Perioden in besonders starkem Maße.

3.5.2 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen holzanatomischen Frühholz-Variablen rezenter Eichen und langreihigen (kontinuierlichen) Klimazeitreihen

Die klimatische Abhängigkeit „klassischer“ Ringbreiten-Parameter (z.B. Gesamtringbreite) bezieht sich weitestgehend auf den Niederschlag der Sommermonate (siehe Kapitel 3.4). Damit das Klima der Vergangenheit umfassender rekonstruiert werden kann, sind weitere Klima-Proxies gefragt, welche die „klassischen“ ergänzen. Im Zuge der Auswertungen hinsichtlich langjährigen Klima-Wuchsbeziehungen erwiesen sich die FH-Variablen MVA5, MVA und CAabs als besonders klimasensitiv, weshalb sie daher im folgenden näher betrachtet werden.

In Abbildung 3-12 ist der langjährige Zusammenhang zwischen der MVA5-Chronologie des Mains und der April-Temperatur (Klimastation Würzburg) (rechts) und der Verlauf der beiden Zeitreihen (links) dargestellt.

Die lineare Beziehung beider Index-Kurven weist einen signifikanten Korrelationskoeffizienten von r = 0,46 (n=105) auf. Diese Korrelation basiert weniger auf den Jahr-zu-Jahr-Schwankungen (hochfrequentes Signal, welches die Streuung um die Ausgleichsgerade der Korrelation erzeugt) als auf dem synchronen niederfrequenten Verlauf über die gesamte Zeit. Der Scatter-Plot belegt dies deutlich: Der Jahr-zu-Jahr-Zusammenhang ist signifikant, gibt aber nicht die hohe Synchronität beider Kurven auf der niederfrequenten Skala wieder.

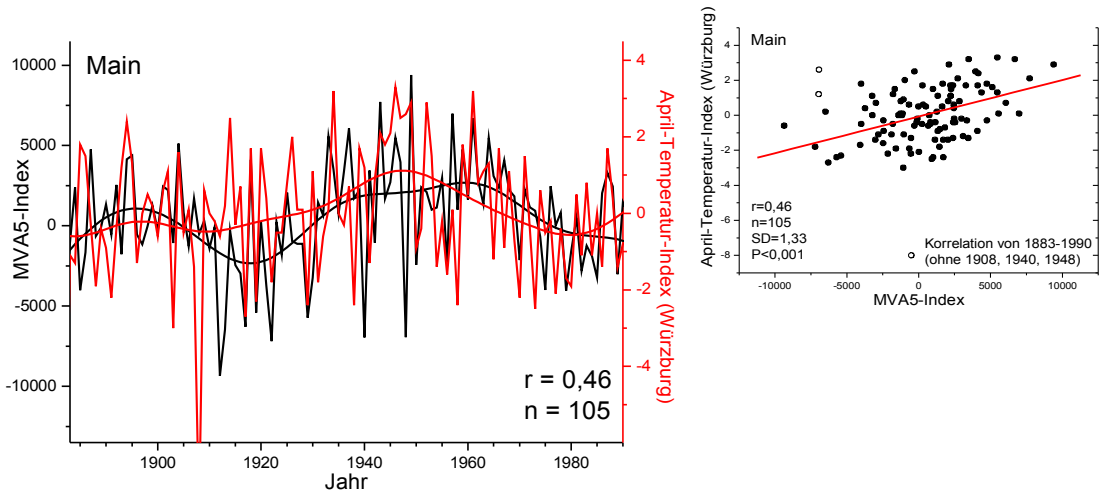


Abb. 3-12: Synchronverlauf zwischen April-Temperatur-Index (rot, Würzburg) und MVA5-Chronologie des Mains (schwarz) von 1893-1990 (**links**). Die Jahre 1908, 1940 und 1948 wurden als Ausreißer definiert und nicht in die Berechnung einbezogen, sind aber in der Abbildung enthalten. Scatter-Plot (**rechts**) zur linken Abbildung mit Regressionsgerade und Ausreißer (o). - r = Korrelationskoeffizient; n = Anzahl der verglichenen Jahre; SD = Standardabweichung; Glättung durch Fast Fourier-Transformation im 11-jährigen Fenster.

Die nachfolgende Tabelle 3-1 fasst die statistisch signifikanten Zusammenhänge zwischen den FH-Variablen MVA5, MVA, CAabs und langjährigen Klimazeitreihen der Temperatur zusammen.

Die untersuchten FH-Variablen zeigen signifikant positive Zusammenhänge mit der Temperatur. Besonders stark positive Zusammenhänge treten zwischen den MVA5-Chronologien von Main und Donau mit der April-Temperatur auf; die MVA5-Chronologie des Rheins korreliert signifikant mit der Februar-Temperatur. Die MVA-Chronologien folgen prinzipiell den Zusammenhängen der MVA5-Chronologien, allerdings mit geringeren Korrelationswerten.

Die FH-Variable CAabs weist andere Klima-Wuchsbeziehungen auf: die Berechnungen belegen eine stark negative Abhängigkeit von der Mai-Temperatur.

Tab. 3-1: Signifikante Korrelationen zwischen FH-Variablen und langjährigen Klimazeitreihen. - r = Korrelationskoeffizient; n = Anzahl der verglichenen Jahre; X = keine signifikante Korrelation (p > 0,05).

FH-Variable	August-Temp. (Vorjahr)	Februar-Temp.	April-Temp.	Mai-Temp.
Main_MVA5	X	X	r = 0,46 (n = 105)	X
Donau_MVA5	X	X	r = 0,39 (n = 54)	X
Rhein_MVA5	X	r = 0,29 (n = 54)	X	X
Main_MVA	X	r = 0,25 (n = 108)	r = 0,36 (n = 108)	X
Donau_MVA	X	X	r = 0,36 (n = 54)	X
Rhein_MVA	r = -0,43 (n = 54)	r = 0,30 (n = 54)	X	X
Main_CAabs	X	X	X	r = -0,39 (n = 108)
Donau_CAabs	X	X	X	r = -0,44 (n = 54)

Hinsichtlich der Klimasensitivität kann aus Tabelle 3-1 geschlossen werden, dass alle FH-Variablen eindeutige Temperatur-Zusammenhänge zeigen. Dies ist deshalb besonders hervorzuheben, da die klimatischen Zusammenhänge der „klassischen“ Jahrring-Proxies (z.B. Spätholzbreite) deutlich mit dem Niederschlag in Verbindung zu bringen sind.
Die FH-Variablen müssen daher als wichtige Klima-Proxies gesehen werden, die die klassischen ergänzen.

3.5.3 Klima-Wuchsbeziehungen zwischen holzanatomischen Frühholz-Variablen rezenter Eichen und klimatischen (nicht-kontinuierlichen) Einzelereignissen

Während im vorherigen Kapitel 3.5.2 Wuchsbeziehungen zu langreihigen kontinuierlichen Klimazeitreihen dargelegt sind, soll es in diesem Kapitel um die nicht-kontinuierliche Beziehung zwischen den FH-Variablen und klimatischen Einzelereignissen gehen. Unter einem klimatischen Einzelereignis soll eine Periode mit extremer Witterung, die wenige Tage bis maximal Wochen dauert, verstanden werden, und die nur in einzelnen Jahren auftritt (singuläres Extremereignis).

Abbildung 3-13 zeigt die Verläufe der MVA5-Chronologien an Main, Donau und Rhein in den Jahren von 1912 bis 1966.

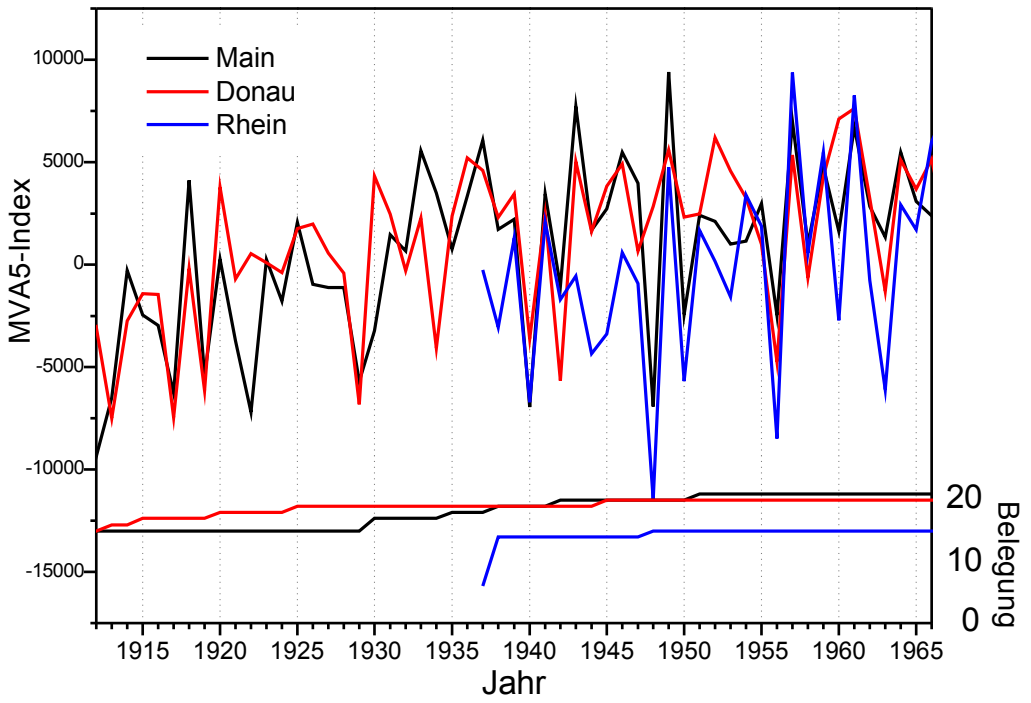


Abb. 3-13: Verlauf der MVA5-Chronologien an Main (schwarz), Donau (rot) und Rhein (blau). Hohe Gleichläufigkeit ist zwischen 1913-1920, 1939-42, 1948-50 und 1955-65 zu erkennen. Extreme Einbrüche in den MVA5-Chronologien („Negativjahre“) finden sich in den Jahren 1940, 1948 und 1956.

Besonders auffällig sind Perioden, in denen die MVA5-Chronologien in hoher Synchronität verlaufen: 1913-20, 1939-42, 1948-50 und 1955-65. Diese Perioden zeichnen sich vor allem durch starke Einbrüche („Negativjahre“) im Index aus, also um weit unterdurchschnittliche Querschnittsflächen der FH-Tracheen zum Beginn der Frühholzbildung. Um zu überprüfen, ob solche Perioden stark synchron verlaufender MVA5-Chronologien auch den Ergebnissen aus Kapitel 3.5.2 über kontinuierliche, längerfristige Zusammenhänge genügen, oder ob diesen ein weiterer klimatischer Faktor zugrunde liegt, sind Einzeljahre analysiert worden. Die Datenlage der Klimaparameter ist an der Donau (Klimastation Ulm) vor dem Zeitraum 1934 sehr dürftig, so dass in den folgenden Abschnitten nur sicher belegte Klimadaten Verwendung finden.

Analysiert man die Klimadaten (Temperatur, Niederschlag, Abfluss, Wasserstand, scPDSI etc.) des Jahres 1940 – in der alle drei MVA5-Chronologien von Main, Rhein und Donau einen deutlichen Einbruch zeigen – fallen die tiefen, großräumig wirksamen Winter-Temperaturen (DEZ bis Feb) mit Abweichungen von bis zu -11,1°C vom langjährigen Mittel auf. Das langjährige Mittel der Temperatur (DEZ bis Feb) an der Klimastation Würzburg liegt beispielsweise bei +0,5°C.

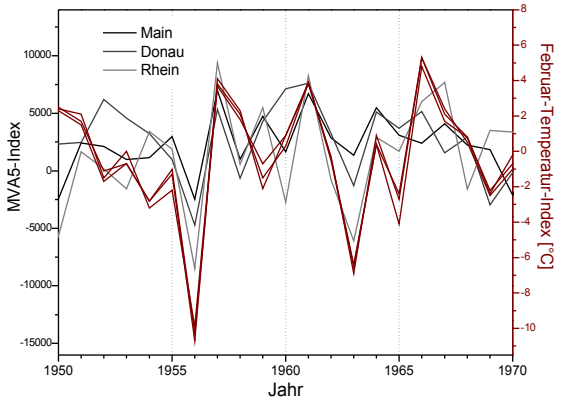


Abb. 3-14: Verlauf der MVA5-Chronologien an Main, Donau und Rhein sowie die Februar-Temperaturen der Stationen Würzburg, Ulm und Karlsruhe. Der Synchronverlauf in der Periode von 1955-65 ist gut zu erkennen, besonders auffällig in Jahren tiefer Februar-Temperaturen (1956, 1963).

Der in Abbildung 3-14 dargestellte Verlauf der MVA5-Chronologien und den Zeitverläufen für die Abweichungen der Februar-Temperatur vom langjährigen Mittel (Klimastationen an Main, Donau und Rhein), zeigen einen weiteren starken Zusammenhang zwischen unterdurchschnittlichen Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße zu Beginn der Frühholzbildung und äußerst tiefen, über mehrere Wochen im Monat Februar des Jahres 1956 wirksamen Temperaturen. Die Analyse zeigt, dass die mittlere Temperatur im Monat Februar des Jahres 1956 um 10,7°C unter dem langjährigen Mittel liegt. Dieser ist damit einer der kältesten Monate innerhalb der letzten 100 Jahre in Süddeutschland.

In einem weiteren Beispiel wird dargelegt, dass neben monatlichen sogar tägliche Witterungsparameter betrachtet werden müssen: 1948, ein starkes „Negativjahr“ in den MVA5-Chronologien an Main und Rhein, lässt sich durch lang anhaltende, besonders negative Temperaturen in den Wintermonaten nicht erklären, denn der Januar war um +4,8°C und der Februar um +0,6°C wärmer als das langjährige Mittel. Betrachtet man jedoch den Temperaturverlauf von Januar bis Februar auf Tagesbasis, so findet sich eine kurze aber dennoch sehr kalte Phase vom 19.-28. Februar mit Tagesminimum-Temperaturen von bis zu -12,8°C eingeschoben, die für die FH-Tracheenbildung entscheidend war.

In Tabelle 3-2 sind die Ergebnisse aus den Jahr-zu-Jahr-Analysen zusammengefasst. Jahre, in denen die MVA5-Chronologien stark negative Einbrüche aufzeigen, und Phasen, in denen extreme Negativabweichungen von der Mittle-Temperatur auftraten, sind aufgeführt.

Tab. 3-2: Phasen extrem niedriger Temperaturen in den Wintermonaten (Abw. vom langjährigen Mittel) und Jahre, in denen die MVA5-Chronologien an Main, Donau bzw. Rhein stark negative Einbrüche aufweisen. Die Berechnungen basieren auf langjährigen Klimazeitreihen von Stationen an Main, Donau und Rhein (angegeben ist die jeweils niedrigste Temperatur an den einzelnen Klimastationen).

Jahr	Phase von extrem kalten Winter-Temperaturen...	...im Gebiet
1929	Januar bis zu -8,7°C, Februar bis zu -10,6°C	Main, Donau
1940	Dezember bis Februar bis zu -11,1°C	Main, Rhein, Donau
1942	8.-24. Januar bis zu -11,4°C (Tagesminimum -23,3°C)	Main, Rhein, Donau
1948	19.-28. Februar bis zu -12,8°C	Main, Rhein
1956	Februar bis zu -10,7°C	Main, Rhein, Donau
1963	Februar bis zu -6,9°C	Main, Rhein, Donau
1979	1.-8. Januar bis zu -12,7°C (Tagesminimum -20,3°C)	Main, Rhein, Donau
1985	Januar bis zu -5,6°C	Main, Rhein, Donau

Aus Tabelle 3-2 und Abb. 3-14 ist der enge Zusammenhang zwischen extrem kalten Phasen in den Wintermonaten und starken Abweichungen in den Querschnittsflächen von FH-Tracheen (MVA5-Variable) ersichtlich. Die Zeiträume extrem kalter Temperaturen sind unterschiedlich lang und können zwischen ein paar Tagen (z.B. 1.-8. Januar 1979) oder bis zu ein paar Monaten (z.B. Dezember-Februar 1940) andauern, was eine genaue zeitliche Zuordnung der Wuchsantworten der Bäume erschwert.

Dennoch zeigend die Einzeljahr-Analysen sehr deutlich, dass sehr kalte Winter-Perioden eine Reduzierung der Querschnittsflächen von Frühholz-Tracheen zur Folge haben können, wenn sie in die zeitliche Nähe des Blattaustriebs fallen. Daher sind Winter-Signale von Proxies in der Regel viel seltener in Naturarchiven zu finden als Sommer-Signale. Dementsprechend sind sie besonders wichtig für zukünftige Klimarekonstruktionen.

Eine rein optische Erkennung solcher Ereignisjahre (beispielsweise Negativjahre in MVA5-Chronologien) entzieht sich der visuellen Leistungsfähigkeit unserer Augen. Eine automatisierte bildanalytische Vermessung von FH-Variablen ist daher unerlässlich.

3.6 Ausprägung holzanatomischer Anomalien in Abhängigkeit von Baumalter, Stammhöhe und Standort

In den folgenden Abschnitten wird dargelegt, wie variabel bzw. homogen die Ausprägungen holzanatomischer Anomalien innerhalb von Eichen sind. Speziell wird auf die Abhängigkeit des Markalters, der Stammhöhe und des Standortes eingegangen. Die Beschreibungen und die Benennungen der holzanatomischen Anomalien können in Kapitel 2.12 nachgeschlagen werden.

3.6.1 Ausprägung holzanatomischer Anomalien in Abhängigkeit vom Baum- (Mark-) Alter

Das Markalter gibt exakt die Anzahl an gebildeten Jahrringen in einer bestimmen Stammhöhe (Höhe der Beprobung) vom Zentrum des Baumes bis zur Borke an. Wird das Mark bei der Beprobung nicht getroffen, so kann dennoch sein Alter relativ genau abgeschätzt werden.
Die folgende Untersuchung soll Aufklärung darüber bringen, ob die Ausprägung von holzanatomischen Anomalien vom Markalter abhängig ist. Je nach Abhängigkeit bestünde die Dringlichkeit – vor allem in der Subfossil-Studie – das Baumalter zu ermitteln was in manchen Fällen schwierig ist, da nur Stammfragmente vorliegen.

Die Jahrringnummer (Anzahl der Jahrringe bis zum Mark) wird bei den folgenden Angaben über das absolute Kalenderjahr ergänzt (Angabe in Klammer): z.B. 85ster Jahrring (1966) bedeutet 85 Jahrringe bis zum Mark (dieser Jahrring wurde im Kalenderjahr 1966 gebildet).

Tabelle 3-3 gibt eine Übersicht über die Abhängigkeit holzanatomischer Anomalien vom Markalter und Standort.

Tab. 3-3: Markalters- und Standortsabhängigkeit holzanatomischer Anomalien. Merkmalsbeschreibung siehe Kapitel 2.12.
- Plus (**+**) = abhängig, Minus (**-**) = unabhängig, ? = unsicher.

Merkmal	altersabhängig	standortsabhängig
C/D/E	-	-
F	+	-
T	-	-
N/N+	-	-
A+/A-	-	-
G	+	+
SEV	- (?)	- (?)

Eine Abhängigkeit holzanatomischer Anomalien vom Markalter lässt sich nur bei den Merkmalen F (Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen) und Merkmal G (traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen) sicher erkennen. Merkmal SEV (schmale Frühholz-Tracheen) zeigt keine gesicherte Abhängigkeit vom Markalter. Bei allen weiteren Merkmalen konnte keine Abhängigkeit vom Markalter festgestellt werden. Die Abhängigkeit zwischen holzanatomischen Anomalien und dem Standort wird in Kapitel 3.6.2 beschrieben.

Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F), bzw. auch die Kombination mit Merkmal T (traumatisches Gewebe), tritt vornehmlich nahe des Marks auf und findet sich zumeist bis zu einem Markalter von 35 bis 40 Jahren; so z.B. im 2ten Jahrring (1913) einer Eiche am Standort Rust (Rhein) und im 35ten Jahrring (1894) einer Eiche am Standort Euerheim (Main). In Ausnahmefällen findet sich die Merkmalskombination F/T 93 Jahre (1913) vom Mark entfernt (Standort Reutlingen/Schwäbische Alb). Das Auftreten des Merkmals F bzw. F/T mehr als 50 Jahrringe vom Mark entfernt bleibt dennoch eine Ausnahme.

Zum Auftreten traumatisch vergrößerter Spätholz-Tracheen (Merkmal G) kann, aufgrund vier nah beieinander liegender Standorte unterschiedlichen Alters, Folgendes gesagt werden: Die Eichen der Standorte Au1, Au2 und Leimersheim zeigen das Merkmal G zwischen dem 54sten und dem 130sten Jahr (1999); diese Eichen befinden sich in einer adulten Lebensphase. Hingegen weist keine der Eichen am Standort Au3 eine deutlich sichtbare Veränderung in der Holzanatomie auf. Im Jahr 1999 entspricht dies einem Mar-

kalter von nur sechs bis acht Jahren.

Die Ausbildung schmaler Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV) findet sich sehr selten und nur in vereinzelten Eichen. Eine klare Aussage kann daher nicht getroffen werden.

Dichtebänder (Merkmal C, D, E) treten völlig unabhängig vom Markalter auf. Z.B. findet sich ein Dichteband (Merkmal C) im 179sten Jahrring (1953) einer Eiche am Standort Riedlingen/Donau, im 85sten Jahrring (1966) einer Eiche am Standort Au/Rhein (Merkmal D) und im 9ten Jahrring (1960) einer Eiche am Standort Freudenberg/Main (Merkmal D).

Für die Merkmale N/N+ und A+/A- kann ebenfalls keine Abhängigkeit vom Markalter festgestellt werden. Einjährige abrupte Zuwachsreduktionen mit stark vermindertem oder komplett fehlendem Spätholz lassen sich bei jedem Markalter nachweisen. Bei einer Eiche des Dettelbacher Standortes (Main) z.B. im 20ten (1918), 43ten (1941), 59ten (1957) und 78ten (1976) Jahrring (Merkmal N). Eine Riedlinger Eiche (Donau) zeigt beispielsweise eine abrupte Verbreiterung des Frühholz-Zuwachses (Merkmal A+) im 10ten Jahrring (1828) und eine Eiche des Standortes Rust (Rhein) im 68ten (1929).

Die Untersuchung zeigt eine deutliche Abhängigkeit der Merkmale F und G vom Markalter, während für alle anderen Merkmale dies nicht beobachtet werden kann.

3.6.2 Holzanatomische Anomalien und deren Abhängigkeiten vom Standort

Eine Übersicht über die Abhängigkeit holzanatomischer Anomalien vom Standort gibt Tabelle 3-3. Holzanatomische Veränderungen und ihre Abhängigkeiten vom Standort lassen sich an den untersuchten Eichen, die auf extrem trockenen bis hin zu regelmäßig überschwemmten Standorten vorkommen, sehr detailliert studieren.

Mit Ausnahme der Merkmale G (traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen) und SEV (Schmale Frühholz-Tracheen) findet sich bei keiner der verbleibenden holzanatomischen Anomalien eine Abhängigkeit vom Standort, d.h. kein Merkmal ist standortstypisch.

Es soll das Merkmal F (verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen) als Beispiel dienen: Merkmal F tritt im Jahr 1913 in Eichen auf, die auf völlig verschiedenen Standorten

wachsen. Eichen an Standorten mit sehr guter (z.B. Au/Rhein) bis hin zu sehr schlechter Wasserversorgung (z.B. Reutlingen/Schwäbische Alb), Eichen an Standorten mit unterschiedlichen Bodentypen und Eichen an flachen (z.B. Dettelbach/Main) bis sehr steilen Standorten (z.B. Faulbach/Main) zeigen dieses Merkmal. Für die Merkmale C/D/E, F, T, N/N+, A+/A- gilt dasselbe.

Bei den Merkmalen G (traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen) und SEV (schmale Frühholz-Tracheen) lässt sich diese Unabhängigkeit vom Standort nicht feststellen. Diese weisen strikte Standortsabhängigkeit auf: Merkmal G findet sich in Eichen von Auwald-Standorten am Oberrhein und Merkmal SEV in Eichen eines Auwald-Standortes an der Donau bzw. in Eichen des Standortes Baunach/Main (der allerdings nicht als typischer Auwald-Standort definiert werden kann). Die Ausprägung des Merkmals G kann nur noch in einer Eiche des Standortes Riedlingen im Jahr (1983) festgestellt werden, der als lichter Standort mit guter Wasser- und Nährstoffversorgung charakterisiert werden kann.

3.6.3 Stammquerschnitts-Kontinuität holzanatomischer Anomalien

Die Ausprägungen der Merkmale ließen sich an jeder untersuchten Eiche an mindestens zwei Radien ermitteln; vereinzelt lagen auch komplette Stammscheiben vor. Das duale Auftreten (in beiden Radien) holzanatomischer Veränderungen im selben Jahr ist in über 80 % der Fälle vorhanden; singuläres Auftreten (in einem Radius) ist dementsprechend seltener anzutreffen.

Während die Merkmale C, D, E, F, T, N, N+ und G dual auftreten, fanden sich die Merkmale A+, A- und SEV weit häufiger singulär. Eine Untersuchung an nur einem Bohrkern bzw. Radius müsste daher kritisch betrachtet werden.

3.6.4 Stammhöhen-Kontinuität holzanatomischer Anomalien

Das kontinuierliche Auftreten holzanatomischer Anomalien entlang der Stammhöhe ist ein wichtiger Bestandteil bei der Interpretation der Ergebnisse in der Subfossil-Studie, da die Stammhöhen der subfossilen Proben nicht immer exakt ermittelt werden können. Die Kontinuität holzanatomischer Anomalien entlang der Stammhöhe kann nur anhand einzelner Eichen überprüft werden. So konnte eine Eiche am Standort Au2/Rhein zwischen Null und vier Meter Stammhöhe auf die Kontinuität des Merkmals G (traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen) und die Merkmale D bzw. E (Dichtebänder) hin untersucht werden;

Proben von sechs Eichen des Standortes Oppenheim/Rhein (Kühkopf) gingen ebenfalls in diese Art der Untersuchung ein (Proben aus Stammhöhen zwischen 0,4 bis 15 Meter).

Tabelle 3-4 zeigt das Auftreten von Dichtebändern (Merkmale D, E) und traumatisch vergrößerten Spätholz-Tracheen (Merkmal G) entlang der Stammhöhe einer Eiche des Auwaldstandortes Au am Rhein.

Im Jahr 1982 lässt sich ein Dichteband (D) in 25 cm Stammhöhe ermitteln; die Proben der weiteren Höhen sind frei von Anomalien.
Im Jahr 1986 weist die Eiche in 50 und in 300, 350 und 400 cm Dichtebänder auf. Während an der Stammbasis (50 cm) ein Dichteband inmitten des Spätholzes (D) zu finden ist, verändert sich dessen Lage zwischen 300 - 400 cm hin zum Ende des Spätholzes (E). Die Proben der anderen Stammhöhen sind frei von holzanatomischen Anomalien. Merkmal G konzentriert sich im Jahr 1999 ausschließlich auf den unteren Stammabschnitt, der während eines Jahrhundert-Hochwassers überflutet worden war, und findet sich in 25, 100 und 150 cm. Ab einer Stammhöhe von 200 cm ist Merkmal G nicht mehr ausgeprägt. Bei einer weiteren Eiche, die in Brusthöhe und in 4 Meter Stammhöhe beprobt werden konnte, verschwindet Merkmal G in 4 Meter Stammhöhe, während es sich zweifelsfrei in Brusthöhe nachweisen lässt.

Tab. 3-4: Auftreten von Dichtebändern (D, E) und traumatisch vergrößerten Spätholz-Tracheen (G) entlang der Stammhöhe einer Eiche des Standortes Au2/Rhein. - D,E = Dichteband, G = traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen.

Höhe [cm]	1982	1986	1999
25	D		G
50		D	
100			G
150			G
200			
250			
300		E	
350		E	
400		E	

Die Eichen des Auwaldstandortes Oppenheim/Rhein (Kühkopf) konnten über wesentlich mehr Zuwachsjahre und Stammhöhen auf holzanatomische Anomalien untersucht werden. Insgesamt standen sechs Eichen zur Verfügung, in denen die Ausprägung holzanatomischer Anomalien zwischen 0,4 bis 15 Metern verfolgt werden konnte (fünf bis sieben Proben aus verschiedenen Stammhöhen pro Eiche).

An dieser Stelle können nur die Merkmale N und C/D näher betrachtet werden, da nur diese aufgetreten sind. Beispielsweise fällt bei einer Oppenheimer Eiche entlang von fünf Meter Stammhöhe die Bildung von Spätholz im Jahre 1977 völlig aus (Merkmal N).

In den Jahren 1951 bis 1953 ist in einer anderen Oppenheimer Eiche - in Stammhöhen von 0,4 und 5 Meter - je ein Dichteband lokalisiert (Merkmal C), in der dazwischen untersuchten Probe (Stammhöhe 2,5 m) nicht.

Die selbe Eiche weist im Jahr 1923 in 2,5 und 5 Meter Stammhöhe je ein Dichteband (Merkmal C) auf; in 0,4 Meter jedoch nicht, dafür aber eine ausgeprägte Reduktion des Spätholzes (Merkmal N). In den Jahrringen des Jahres 1869 dagegen ist in allen drei untersuchten Proben je ein Dichteband vertreten: Dichtebänder am Ende des Frühholzes (Merkmal C) in den unteren beiden und inmitten des Spätholzes (Merkmal D) in der oberen Stammhöhe.

Bei zwei weiteren Oppenheimer Eichen standen Proben bis 15 Meter Stammhöhe zur Durchsicht bereit. In den Jahrringen der Jahre 1952, 1953 und 1954 lassen sich Dichtebänder am Ende des Frühholzes (Merkmal C) durchweg bis in 15 Meter Stammhöhe verfolgen; ebenso z.B. 1918 und 1923. Dagegen ist im Jahrring von 1902 nur in einer Stammhöhe von 15 Meter ein Dichteband zu erkennen, darunter aber nicht.

Es muss jedoch an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Ergebnisse dieses Kapitels auf insgesamt 7 Eichen beruhen, die vom gleichen Standortstyp (Auwald) herrühren. Über diverse andere holzanatomische Anomalien, wie beispielsweise über verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F), können an dieser Stelle keine Aussagen getroffen werden.

Im Allgemeinen fand sich eine recht homogene Ausprägung holzanatomischer Anomalien entlang der Stammhöhen. Die Lage, beispielsweise eines Dichtebandes, kann zwar entlang der Stammhöhe variieren, doch tritt kein holzanatomisch „entferntes“ Merkmal in Erscheinung (z.B. Merkmal T anstelle Merkmal D). Eine „Entwicklung“ des Merkmals D zu E und anschließend in Merkmal N scheint häufig vorzukommen. Bei Merkmal G kann sicherlich von einer „echten“ Abhängigkeit von der Stammhöhe gesprochen werden.

3.6.5 Häufigkeit und Homogenität holzanatomischer Anomalien an den Rezent-Standorten

Die Häufigkeit (Anzahl) der holzanatomischen Anomalien muss in ihrem Auftreten als sehr unterschiedlich beurteilt werden. Merkmale C, D, E, N, N+ finden sich sehr häufig, wohingegen die Merkmale F, T, A+, A- deutliche seltener auftreten. Merkmale G und SEV treten sehr selten innerhalb der Rezent-Studie auf.

In „Spitzenjahren“ tritt ein bestimmtes Merkmal in sehr vielen Eichen an einem Standort auf. Am Standort Gundremmingen 2 (Fingadowald, Donau) zeigen im Jahr 1953 fünf von sechs Eichen Dichtebänder (Merkmal C, D). Sechs von elf Eichen weisen im Jahr 1913 am Standort Reutlingen (Schwäbische Alb) verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) auf. Am Standort Dettelbach (Main) findet sich im Jahr 1921 in acht von zehn

Eichen fehlendes Spätholz (Merkmal N, N+) und im Jahr 1999 zeigen sechs von acht Eichen am Standort Au 2 (Rhein) traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G) - um nur einige Beispiele zu nennen, die die Homogenität holzanatomischer Anomalien an den Standorten unterstreicht.

Auf der anderen Seite lassen sich auch im selben Jahr zwei oder mehr unterschiedliche holzanatomische Anomalien an einem Standort ermitteln. Häufig im selben Jahr zu findende Mehrfach-Ausprägungen sind verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) mit traumatischem Gewebe (Merkmal T) oder mit abrupter Steigerung der Frühholzbreite (Merkmal A+). Des Weiteren finden sich Dichtebänder (Merkmal C, D, E) nicht selten in Kombination mit fehlendem Spätholz (Merkmal N).

3.7 Simulation biotischer und abiotischer Umweltereignisse und deren Auswirkungen auf die Holzanatomie in Eichen im Freiland-Experiment (Verifikationsphase)

Um die bereits bekannten und gefundenen holzanatomischen Anomalien rezenter und subfossiler Eichen zu verifizieren, erfolgte im Rahmen dieser Arbeit ein Freiland-Experiment an 64 Eichen, in welchen Frost, Defoliation, Trockenstress und Hochwasser simuliert und durch ökophysiologische Messungen (Dendrometer) begleitet wurden. In diesem Kapitel sind die Ergebnisse zum radialen Zuwachs, aus der Holzanatomie und den Dendrometer-Messungen aufgeführt. Eine Liste der in der Folge als Versuchseichen bezeichneten Bäume mit der jeweiligen Umweltsimulation (Behandlung und Dauer) findet sich im Anhang auf Seite 206.

Bei der Auswertung traten verschiedene holzanatomische Anomalien auf; sowohl bereits bekannte aus Rezent- und Subfossil-Studien, aber auch Anomalien, die in rezenten und subfossilen Eichen nicht zu finden waren. Im Folgenden wird beschrieben, welche biotischen bzw. abiotischen Umweltereignisse (Versuchstyp) zu welchen holz-anatomischen Veränderungen geführt haben.

An Versuchseichen unterschiedlicher Behandlungen waren 14 Dendrometer in Stammhöhen zwischen 20 und 115 cm installiert. Diese Messungen geben Aufschluss über die Zuwachsverläufe vor, während und nach den Experimenten.

Im Versuchsjahr 2006 starben insgesamt 5 Eichen. Vier Eichen trieben nach Beendigung des Trockenstress-Experiments (im Frühjahr) nicht mehr aus. Des Weiteren kam es zum Absterben einer Eiche während eines Hochwasser-Experiments (Frühjahrs-Hochwasser). Alle weiteren 75 Versuchseichen blieben bis zum Ende der Vegetationsperiode 2006 vital.

3.7.1 Radialer Zuwachs der Versuchseichen

Im folgenden werden die Bäume #1 - #60 aufgrund der um ein Jahr früheren Entnahme (getopft Oktober 2004) aus der Baumschule getrennt von den Bäumen #61 - #80 (getopft Oktober 2005) betrachtet.

Abbildung 3-15 zeigt den Gesamtringbreiten-Zuwachs der Versuchseichen in 40 cm Stammhöhe.

Nach einem allgemeinen Anstieg der Gesamtringbreite im Jahr 2002 änderte sich der radiale Zuwachs bis zum Zeitpunkt der Entnahme aus der Baumschule und Umsetzen in das Drahtgewächshaus nur unwesentlich. Im Jahr des Umsetzens fiel bei allen Versuchseichen die Gesamtringbreite markant ab.

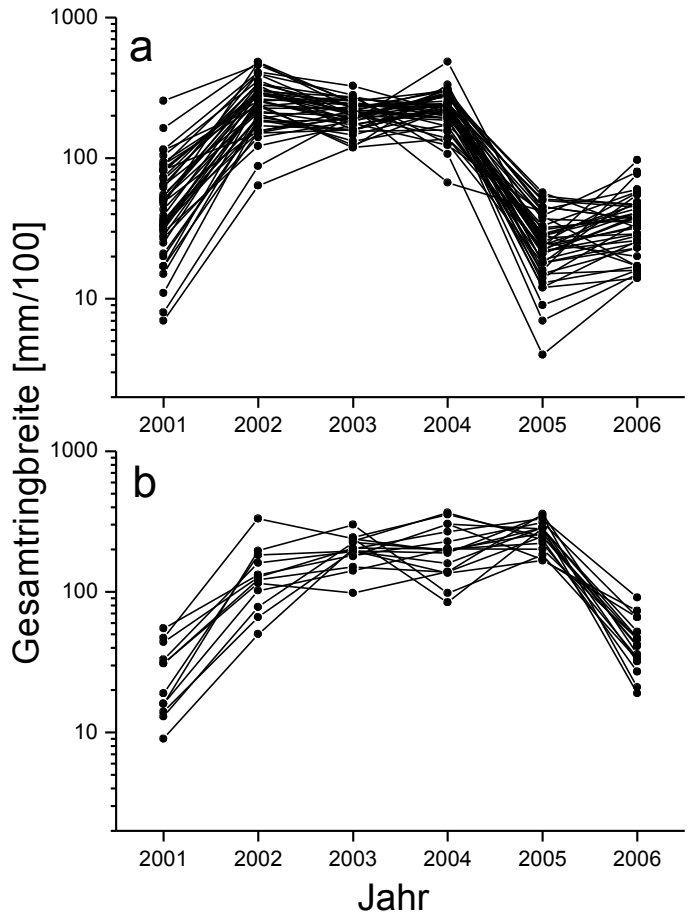


Abb. 3-15: Gesamtringbreiten-Zuwachs der Bäume #1 - #60 (getopft Oktober 2004) **(a)** und #61 - #80 (getopft Oktober 2005) **(b)** in 40 cm Stammhöhe.

Aus Abbildung 3-16 ist der Gesamtringbreiten-Zuwachs der Versuchseichen #1 - #60 entlang der Stammhöhe (20-120 cm) im Versuchsjahr in Abhängigkeit der simulierten Umweltereignisse zu entnehmen.

Der Gesamtringbreiten-Zuwachs der Frost-, Trockenstress- und Defoliations-Eichen bleibt – von wenigen Ausnahmen abgesehen – entlang des Stammes unter 0,5 mm. Neben einer Kontroll-Eiche mit einem Zuwachs unter 0,5 mm zeigt eine zweite Kontroll-Eiche einen Zuwachs bis zu 1,0 mm.

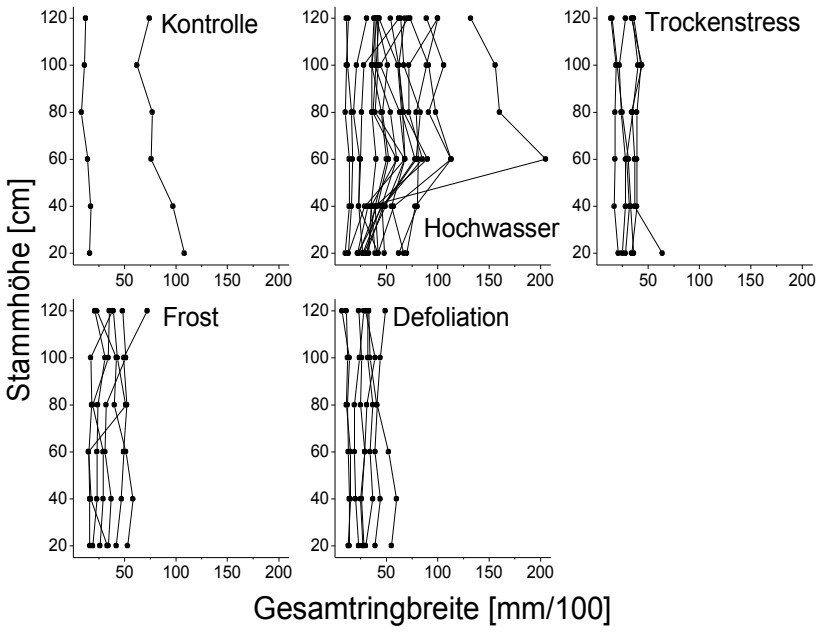


Abb. 3-16: Gesamtringbreiten-Zuwachs am Ende der Vegetationsperiode der Versuchseichen #1 - #60 entlang der Stammhöhe (20–120 cm), aufgeteilt nach Simulationen im Versuchsjahr 2006.

Der Gesamtringbreiten-Zuwachs der Hochwasser-Eichen verläuft sehr heterogen. Bis in eine Stammhöhe von 60 cm (Wasserspiegelhöhe) kommt es zu einer deutlich sichtbaren Zuwachs-Steigerung mit Zuwächsen über 0,5 mm, der oftmals eine Reduzierung des Zuwachses bis 120 cm folgt, d.h. der überflutete Stammbereich ist in der Nähe des Wasserspiegels gefördert.

Abbildung 3-17 zeigt die Gesamtringbreiten-Messungen der Versuchseichen #61 - #80.

Für die im Oktober 2005 getopften Versuchseichen #61 - #80 gilt dasselbe (vgl. Abb. 3-16 und Abb. 3-17). Die Gesamtringbreiten fallen geringfügig breiter als bei #1 - #60 aus, verlaufen aber entlang der Stammhöhe gleichermaßen homogen.

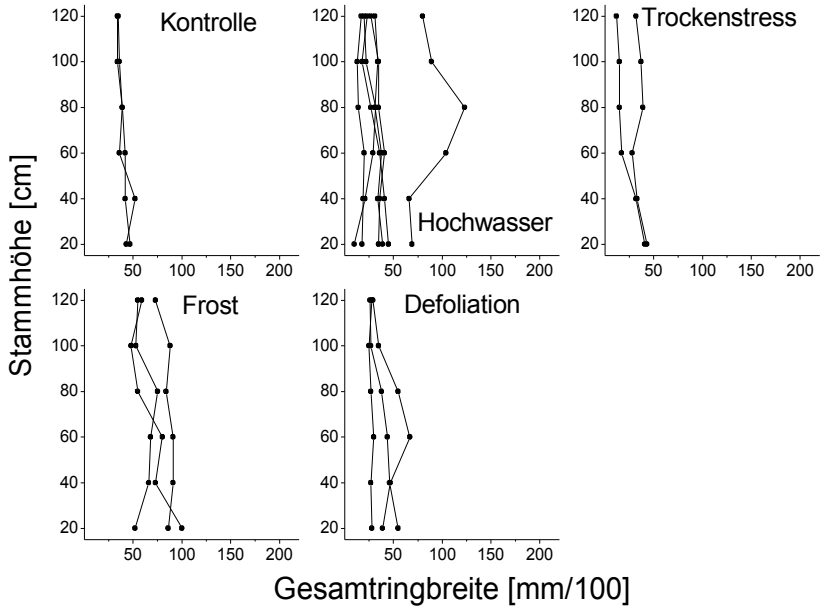


Abb. 3-17: Gesamtringbreiten-Zuwachs am Ende der Vegetationsperiode der Versuchseichen #61 - #80 entlang der Stammhöhe (20-120 cm), aufgeteilt nach Simulationen im Versuchsjahr 2006.

3.7.2 Verteilung der holzanatomischen Anomalien entlang der Stammhöhe

Die dokumentierten holzanatomischen Anomalien in den Versuchseichen finden sich nicht homogen über die komplette Stammhöhe (20 - 120 cm) verteilt.

Merkmal F und Merkmal T finden sich ausschließlich in dem Stammbereich, der direkt Temperaturen unter 0°C ausgesetzt ist. Die Frosteinwirkung ist - je nach Baum – bis in Stammhöhen von 80 - 120 cm simuliert worden, da das Fassungsvermögen der Tiefkühltruhe begrenzt war. In Stammbereichen, die versuchstechnisch bedingt keinem Frost (Temp. > 0°C) ausgesetzt waren, konnten keine holzanatomischen Veränderung festgestellt werden.

Entlang der Stammhöhe treten Dichtebänder sehr heterogen auf. Dichtebänder am Ende des Frühholzes (Merkmal C) und im Spätholz (Merkmal D) treten beispielsweise bei einer Versuchseiche entlang der gesamten Stammhöhe, bei einer anderen nur lokal auf. Während eine Versuchseiche in 100 - 120 cm Dichtebänder aufweist, kommen sie bei anderen nur in Stammhöhen von 20 - 40 cm vor.

Die Merkmale SEV, DEV und G finden sich bei Versuchseichen nur innerhalb des überfluteten Stammbereiches (bis 60 cm). Während das Merkmal DEV bis zu einer Höhe von 60 cm (bis zum Wasserspiegel) auftritt, kann das Merkmal SEV nur in einer Stammhöhe von 20 Zentimetern und Merkmal G in einer Stammhöhe zwischen 20 bis 40 cm gefunden werden.

Bei der Auswertung konnte Merkmal N im Jahr 2006 nur sehr selten beobachtet werden, im Jahr 2005 dagegen sehr häufig, dann bei den meisten Versuchseichen entlang des gesamten Stammes.

3.7.3 Auswirkung von Entlaubung (simulierter Insektenfraß) auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs

Defoliation wurde in zwei Varianten durchgeführt, zum einen simuliert sie Insektenbefall während der Frühholzbildung (Variante 1), zum anderen während der Spätholzbildung (Variante 2). Die holzanatomischen Auswertungen zeigen eine deutliche Reduktion der Spätholzbreite bzw. ein völliges Ausbleiben der Spätholzbildung (Merkmal N). An das meist einreihige Frühholz schließt sich unvermindert die Jahrringgrenze mit den dafür typischen Zellstrukturen an. Ein Beispiel hierfür ist am Jahrring 2005 in Abbildung 3-25 zu sehen.

Im Versuchsjahr 2006 tritt Merkmal N an einer Kontroll-Eiche und an allen fünf Eichen auf, an denen im Frühjahr während der Blattentwicklung bzw. -entfaltung, eine Entlaubung (Variante 1) erfolgte.

Im Folgenden wird pro Versuchstyp die zeitlich hochaufgelöste Zuwachsentwicklung jeweils anhand einer Dendrometer-Messung vorgestellt; alle weiteren Datensätze finden sich im Anhang.

Zuvor wird auf das typische Zuwachsverhalten einer Kontroll-Eiche eingegangen, um so einen Vergleich mit den Dendrometer-Messungen aus den verschiedenen Versuchstypen (Simulationen) zu ermöglichen. Abbildung 3-18 zeigt für eine Kontroll-Eiche den Verlauf ihrer absoluten täglichen Stammdurchmesseränderung, der absoluten Tagesamplitude ihres Stammdurchmessers und die absolute Änderung ihres Stammdurchmessers, jedoch bezogen auf den Durchmesser Vortags.

Der Ablauf Die Zunahme des diametralen Stammzuwachses (Abb. 3-18a) kann in vier Phasen unterteilt werden: In Phase 1 (Tag des Knospenaufbruch = day since budbreak DSB 0-30) erfolgt der diametrale Stammzuwachs nur langsam, während in Phase 2 (DSB=31-70) ein maximaler Zuwachs erreicht wird. In Phase 3 (DSB=71-100) nimmt dieser wieder ab, bis er schließlich in Phase 4 (DSB=101-180) weitestgehend abgeschlossen ist. Die Stammdurchmesseränderung der Kontroll-Eiche setzt am 2. Mai (DSB=1, day of year DOY=122) ein, was sehr gut mit dem ersten beobachteten Knospenbruch am 1. Mai zusammenfällt. Nach 13 Tagen bleibt der Zuwachs für 12 Tage aus, bevor er sich kontinuierlich bis zum 29. August (DSB=119, DOY=241) fortsetzt und dann im Spätsommer zum Erliegen kommt. Die Blätter sind am 31. Mai (DSB=30, DOY=151) voll entwickelt. Neun Tage später lässt sich in den Dendrometerdaten eine deutliche Vergrößerung in der Differenz zwischen Tagesmaximum und- minimum erkennen, die erst Mitte August maximal ist und am 25. August (DSB=116, DOY=237) schnell zurückgeht. Blattverfärbung setzte am 19. Oktober (DSB=171, DOY=292) ein - 52 Tage nach dem diametralen Zuwachsende. Im Verlauf der Vegetationsperiode erreicht die Kontroll-Eiche einen diametralen Zuwachs von ca. 2500µm. Der Hauptzuwachs wird in der Zeit vom 24. Mai (DSB=23, DOY=144) bis 9. August (DSB=100, DOY=221) erreicht.

Zwischen dem 9. Juni (DSB=39, DOY=160) und dem 24. August (DSB=115, DOY=236) finden sich sehr hohe tägliche Stammdurchmessersänderungen (Abb. 3-18b) (Differenz zwischen Tagesmaximum vor Sonnenaufgang und -minimum meist am Nachmittag) von bis zu 400 µm (was einer Schrumpfung von ca. 2,4% bezogen auf den gesamten Stammdurchmesser entspricht). Ab dem 25. August (DSB=116, DOY=237) fallen die Tagesamplituden sehr viel geringer aus.

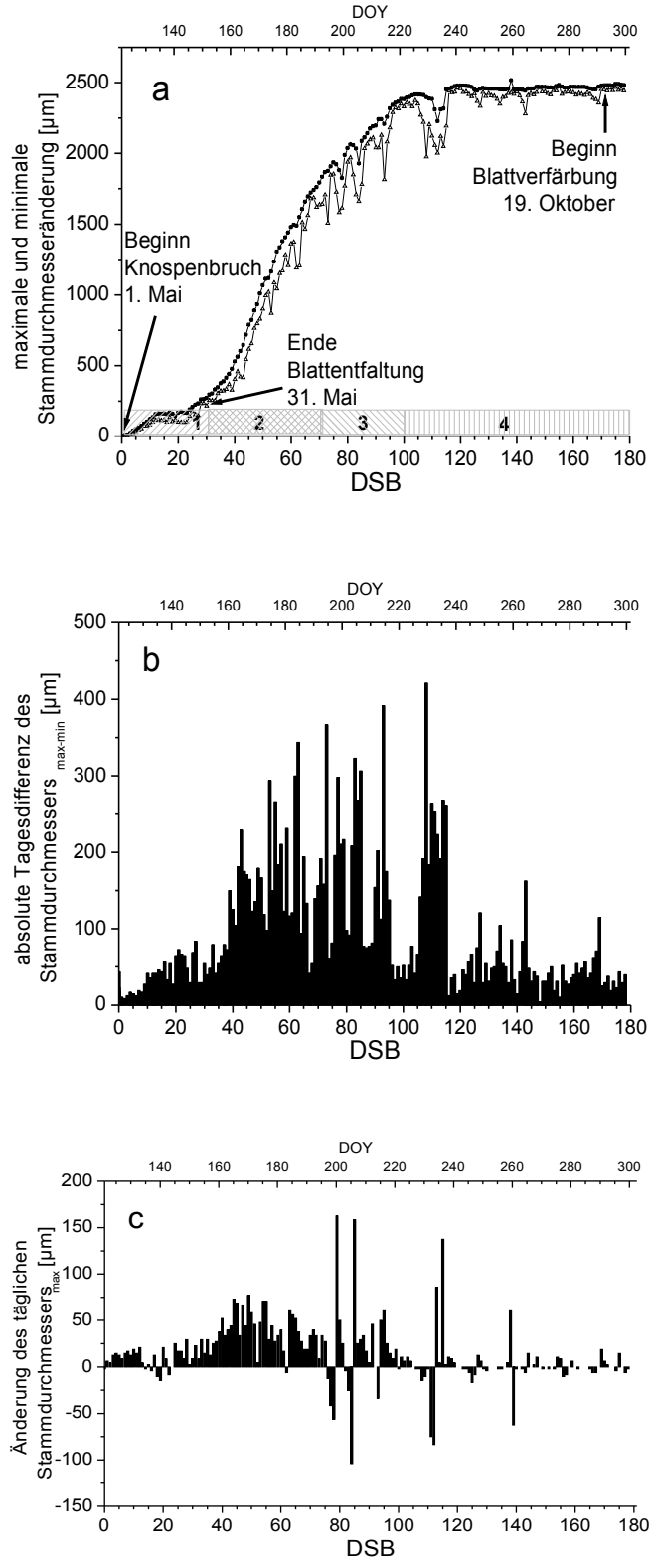


Abb. 3-18: Verhalten des Stammdurchmessers einer Kontroll-Eiche (#10) im Verlauf einer Vegetationsperiode. **(a)** Verlauf des täglichen maximalen (●) und minimalen (∆) Durchmessers (schraffierte Balken 1-4 zeigen Phasen unterschiedlichen Verhaltens des Zuwachses an), **(b)** der absoluten Tagesdifferenz zwischen maximalem und minimalem Durchmesser, **(c)** der täglichen Änderung des maximalen Durchmessers absolut zum Vortag. Knospenbruch setzte am 1. Mai (DSB=0, DOY=121) ein, die Blattentfaltung war am 31. Mai (DSB=30, DOY=151) abgeschlossen, Blattverfärbung lies sich ab 19. Oktober (DSB=171, DOY=292) beobachten. - DSB=Tag nach Knospenbruch (Day since budbreak); DOY=Tag im Jahr (Day of Year); DOY 100=10.Apr.; DOY 150=30.Mai; DOY 200=19.Juli; DOY 250=7.Sept.; DOY 300=27.Okt.

Die Grafik der Stammdurchmesseränderung absolut zum Vortag (Abb. 3-18c) (Differenz zwischen Tagesmaximum$_{t+1}$ und Tagesmaximum$_t$; auch „Stammzuwachs“ genannt) zeigt während der Phase vom 25. Mai (DSB=24, DOY=145) bis 15. Juli (DSB=75, DOY=196) kontinuierlich tägliche Zuwächse bis zu 75 µm bzw. 5% (bezogen auf den gesamten Stammdurchmesser). In der darauf folgenden Phase (16. Juli bis 25. August, DSB=76-116, DOY=197-237) können starke Ab- und Aufsättigungen mit Wasser festgestellt werden (150 µm bzw. 1 Prozent).

Zwei Versuchseichen, die entlaubt wurden, waren ebenfalls mit Dendrometern ausgestattet. Nachstehende Abbildung 3-19 zeigt beispielhaft das Verhalten des Stammdurchmessers während der Wachstumsphase der am 16. Juni entlaubten Eiche #12.

Der Stammdurchmesser nimmt zu Beginn kontinuierlich zu (Abb. 3-19a). Sofort ab dem Tag der Defoliation (16. Juni, DSB=44, DOY=167) ist der diametrale Zuwachs deutlich gebremst (Knick im Kurvenverlauf). Der Gesamtzuwachs im Jahr beträgt nur ca. 1300µm, und erfolgt größten Teils in der Zeit vom 4. Mai (DSB=1, DOY=124) bis zum 16. Juni (DSB=44, DOY=167), also vor der Entlaubung. Deutlich erkennbar: Die tägliche Dickenänderung sinkt auf nahezu Null (Abb. 3-19b), da die transpirierende Oberfläche verschwunden ist, und wird erst zehn Tage später (Neuaustrieb) wieder größer (ab DSB=61, DOY=184) und erreichen dann Werte über 300 µm (bzw. 1,5% des Stammdurchmessers). Das Bäumchen war 41 Tage später erneut voll belaubt. In der Wachstumszeit nach der Entlaubung bis zum 9. Juli (DOY=190) unterscheiden sich die täglichen Dickenänderungen zur Kontroll-Eiche sehr stark. Bei der Kontroll-Eiche steigen diese regelmäßig über 250 µm, während die der entlaubten Eiche zumeist weit unter 100 µm liegen. Die entlaubte Eiche zeigt dann ab dem 9. Juli (DOY=190) bis zum Ende der Vegetationsperiode zur Kontroll-Eiche große Ähnlichkeit im Verlauf der täglichen Dickenänderung. Abbildung 3-19c verdeutlicht die kontinuierliche Änderung des Stammdurchmessers von Tag zu Tag (Tagesmaximum$_{t+1}$ minus Tagesmaximum$_t$) seit Beginn der Wachstumsphase bis zum Zeitpunkt der Defoliation; die Werte liegen fast ausnahmslos im deutlich positiven Bereich, kurz nach der Defoliation treten dann nach Neuaustrieb Phasen mit deutlichen Wasserdefiziten auf (DSB=75-85), die auch nachts nicht mehr regeneriert werden können. Es kommt zu Schrumpfungen des Stammdurchmessers von teils über 50 µm (bzw. 0,3%). Binnen eines Tages kann sich der Wasserspeicher im Stamm wieder auffüllen, was sich an der Änderung des Stammdurchmessers erkennen lässt; die Änderung beträgt über 150 µm bzw. 0,8%.

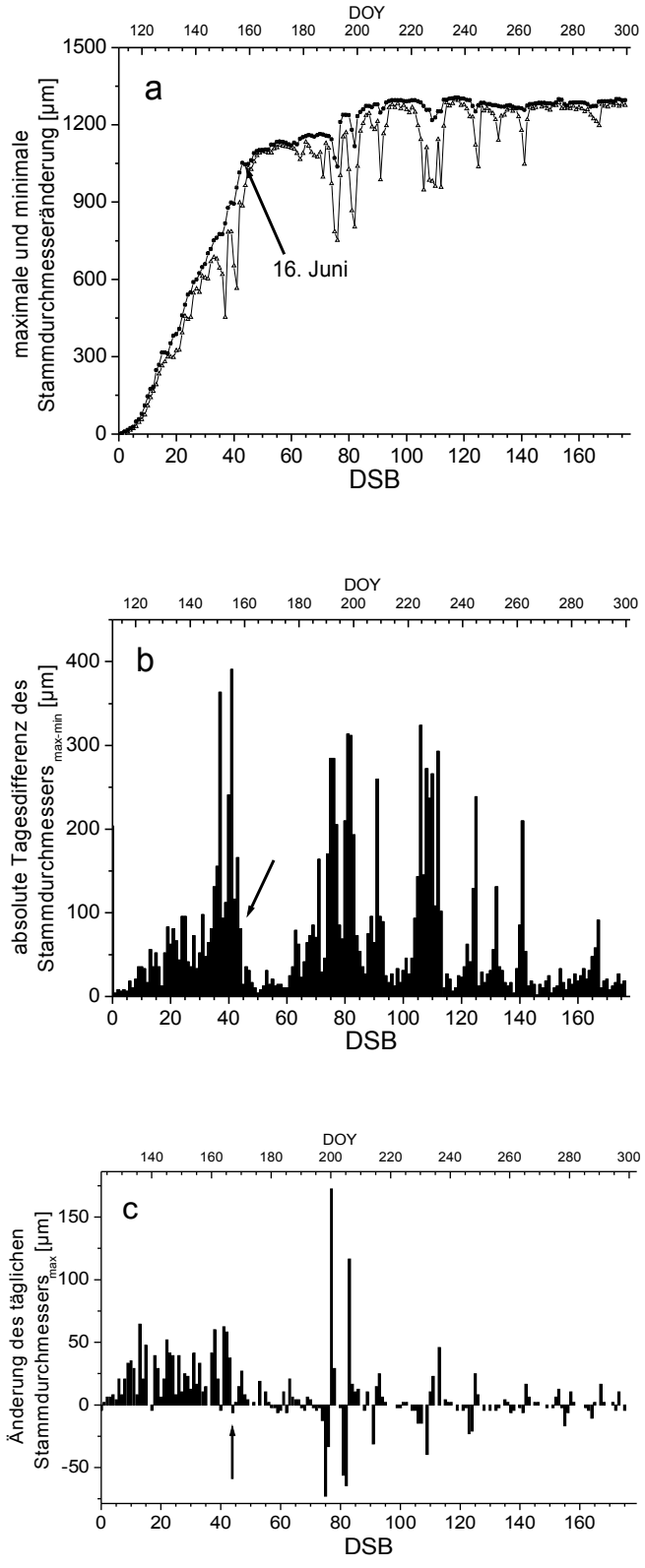


Abb. 3-19: Verhalten des Stammdurchmessers einer Versuchseiche (#12), an der Defoliation am 16. Juni (DSB=44, DOY=167) simuliert wurde, im Verlauf einer Vegetationsperiode. **(a)** Verlauf des täglichen maximalen (●) und minimalen (∆) Durchmessers, **(b)** der absoluten Tagesdifferenz zwischen maximalem und minimalem Durchmesser, **(c)** der täglichen Änderung des maximalen Durchmessers absolut zum Vortag. - ↓=Defoliation; DSB=Tag nach Knospenbruch (Day since budbreak); DOY=Tag im Jahr (Day of Year); DOY 100=10.Apr.; DOY 150=30.Mai; DOY 200=19.Juli; DOY 250=7.Sept.; DOY 300=27.Okt.

3.7.4 Auswirkung von künstlich erzeugtem Trockenstress auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs

Trockenstress wurde ebenfalls in zwei Varianten erzeugt, zum einen während der Frühholzbildung (Variante 1) und zum anderen während der Spätholzbildung (Variante 2). Abbildung 3-20 zeigt die typischen holzanatomischen Veränderungen im Spätholzbereich einer dem Sommer-Trockenstress ausgesetzten Eiche.

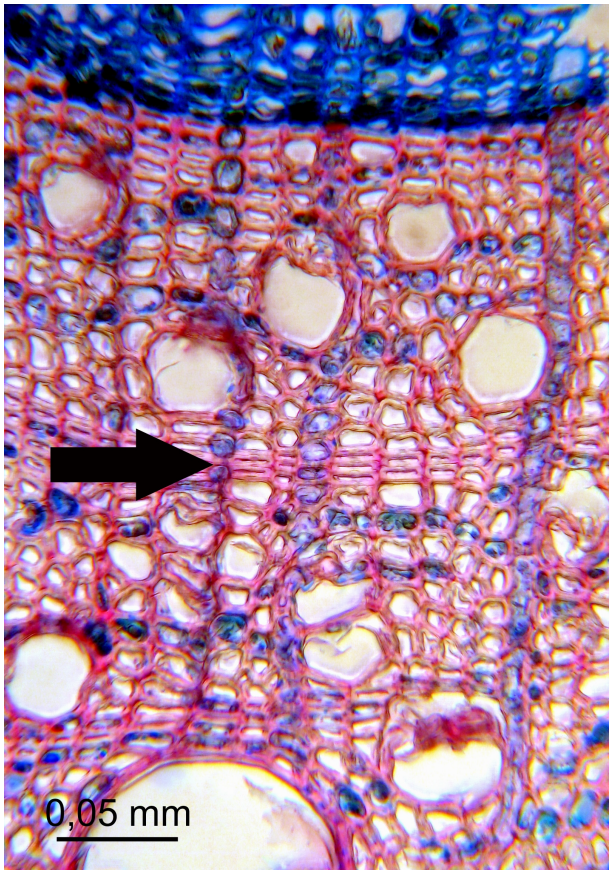


Abb. 3-20: Dichteband (Merkmal D, Pfeil) im Spätholz einer Trockenstress-Eiche (Variante 2, Trockenstress im Sommer) in 40 cm Stammhöhe.

Diese Art von Trockenstress erzeugt markant radial abgeflachte, den Jahrringgrenzen parallel verlaufende Zellen, und eine Anzahl von zwei bis vier Zellen in radialer Richtung (Dichteband). Eine Verminderung der Zellbreite in tangentialer Richtung kann nicht festgestellt werden. Diese Dichtebänder heben sich deutlich von den umliegenden Zellstrukturen ab und können aufgrund ihrer sehr schmalen radialen Zellbreiten sehr gut erkannt werden. Parenchymatische Zellen scheinen nicht betroffen zu sein.

Die holzanatomische Veränderung im Spätholz tritt um so deutlicher hervor, je intensiver der Trockenstress erzeugt wurde. Versuchseichen, bei denen Trockenstress so lange aufrecht erhalten wurde, bis massive Schäden im Kronenbereich sichtbar wurden (Wipfeldürre), zeigen diese Veränderungen besonders deutlich. Tracheen mit leicht vergrößertem Zelldurchmesser lassen sich oftmals im Anschluss an das Dichteband erkennen.

Um eine eventuelle Veränderung in der Querschnittsfläche der Frühholz-Tracheen feststellen zu können, wurde diese an einer Versuchseiche (Trockenstress im Frühjahr,

Variante 1) vermessen und mit Kontroll- und Hochwasser-Eichen verglichen. Extremer Wassermangel führte bei 80% der Eichen zum Absterben - trotz der guten artspezifischen Anpassung an Trockenheit. Die mediane Tracheen-Querschnittsfläche der untersuchten Trockenstress-Eiche ist mit 13300 µm² mehr als doppelt so groß wie bei den Hochwasser-Eichen; die Flächendifferenz beträgt 9000 µm². Die mediane Tracheen-Querschnittsfläche dieser Trockenstress-Eiche liegt aber auf dem gleichen Niveau wie die der Kontroll-Eichen. Eine überdurchschnittliche Vergrößerung der Querschnittsfläche fand demnach nicht statt.

Insgesamt wurden vier Eichen aus den Trockenstress-Versuchen mit Dendrometern versehen, deren Ergebnisse exemplarisch für eine Eiche (Variante 2) in Abbildung 3-21 dargestellt sind.

Zu Beginn der Wachstumsperiode wuchs der Stammdurchmesser der exemplarisch gezeigten Eiche (Abb. 3-21a) ähnlich wie bei allen Eichen an. Mit einsetzendem Wassermangel (2. Juni, DSB=42, DOY=153) verlangsamt sich das Wachstum rapide, bis es gegen Ende der Behandlung massiv einbricht und sogar eine rasche Schrumpfung des Stammdurchmessers von über 1000 µm eintritt. Am Ende des Experiments wiesen die Blätter sehr starke Nekrosen auf. Nach Wiederbewässerung in den Morgenstunden des 15. Juni nimmt der Stammdurchmesser binnen weniger Stunden um über 800 µm zu und erreicht nahezu das Niveau vor der Simulation. Anschließend steigt er bis zum 16. August (DSB=105, DOY=228) weiter an. Der diametrale Stammzuwachs beträgt insgesamt 1100 µm.

Aus Abbildung 3-21b ist zu entnehmen, dass die Tagesamplituden während des Trockenstress-Experiments relativ gering ausfallen, da mit den Minima auch die Maxima stark einbrechen, weil transpirierbares Gewebswasser schnell verbraucht ist. Mit Beendigung des Experiments in den Morgenstunden, füllt sich der Wasserkörper im Stamm binnen weniger Stunden wieder auf und der Stammdurchmesser steigt um über 1000 µm (bzw. fast 8% bezogen auf den gesamten Durchmesser). Die Tagesamplituden in den folgenden Vegetationswochen unterliegen starken Schwankungen. Regelmäßig liegen diese bei Werten von über 300 µm (bzw. 2,4%), was auf einen nicht unerheblichen Wasserstress der Versuchseiche hindeutet – trotz ausreichender Bewässerung in der folgenden Vegetationsperiode.

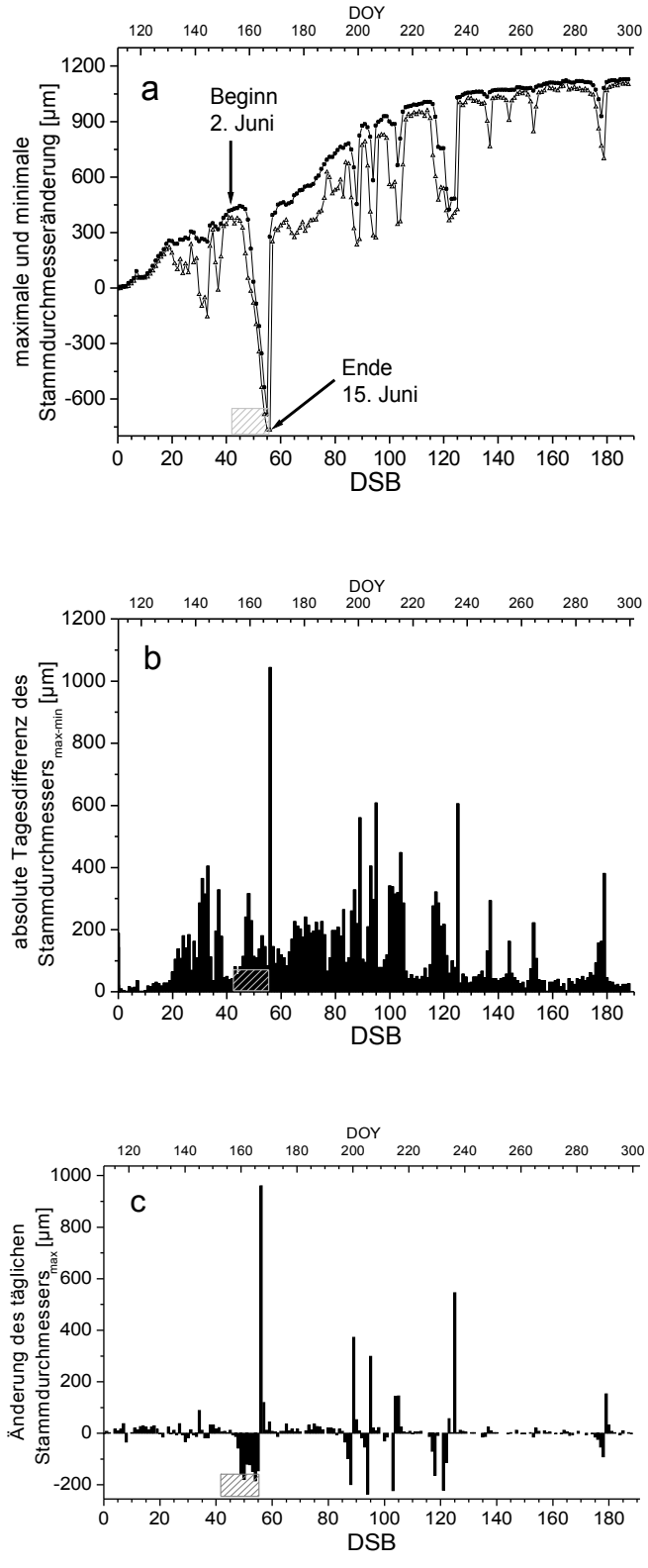


Abb. 3-21: Verhalten des Stammdurchmessers einer Versuchseiche (#37), an der vom 2. Juni (DSB=42, DOY=153) bis 15. Juni (DSB=55, DOY=166) Trockenstress (14 Tage) simuliert wurde (Variante 2), im Verlauf einer Vegetationsperiode. **(a)** Verlauf des täglichen maximalen (●) und minimalen (∆) Durchmessers, **(b)** der absoluten Tagesdifferenz zwischen maximalem und minimalem Durchmesser, **(c)** der täglichen Änderung des maximalen Durchmessers absolut zum Vortag. - ↓=Beginn/Ende Trockenstress; schraffierte Balken=Dauer des Trockenstresses; DSB=Tag nach Knospenbruch (Day since budbreak); DOY=Tag im Jahr (Day of Year); DOY 100=10.Apr.; DOY 150=30.Mai; DOY 200=19.Juli; DOY 250=7.Sept.; DOY 300=27.Okt.

Betrachtet man die tägliche Differenz zwischen den Maxima (Abb. 3-21c), so fallen stark positive und negative Tag-zu-Tag Änderungen von über 400 µm (bzw. über 3%) während der restlichen Vegetationsperiode auf.

In welcher Wachstumsphase die beobachteten Dichtebänder (Abb. 3-20) entstanden sind, lässt sich nicht ermitteln. Vorstellbar ist, dass in der 22-tägigen Trockenperiode die Dichtebänder entstanden sein könnten.

3.7.5 Auswirkung von Frost auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs

Die Frost-Applikationen sind in zwei Varianten durchgeführt worden: Erstens während der Frühholzbildung (Variante 1) und zweitens während der Spätholzbildung (Variante 2).
Das Ergebnis hinsichtlich strukturellen Veränderungen in der Holzanatomie ist sehr homogen:

Alle zehn Versuchseichen weisen unabhängig vom Simulationszeitpunkt ungeordnete und stark vergrößerte Parenchymzellen, Libriformfasern und Fasertracheiden auf (Traumatisches Gewebe; Merkmal T) (Abb. 3-22). Diese Art der Veränderung tritt ausschließlich bei Frostbehandlung auf.

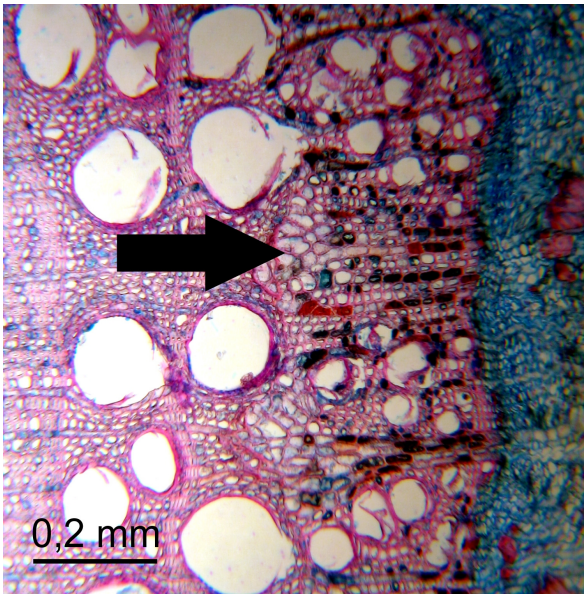


Abb. 3-22: Traumatisches Gewebe (Merkmal T, Pfeil) in einer frostbehandelten Eiche (Variante 2, Frost im Sommer) in 80 cm Stammhöhe.

Je nach Zeitpunkt der Frostbehandlung (Variante 1 = Frühjahr bzw. Variante 2 = Sommer) kann zwischen Merkmal T im Frühholzbereich und im Spätholzbereich unterschieden werden. Während diejenigen Versuchseichen, die eine Frosteinwirkung im Frühjahr erfahren haben, Merkmal T in Kombination mit Merkmal F aufweisen, zeigen Versuchseichen mit Frostbehandlung im Sommer nur Merkmal T.

Die bereits verholzten Frühholz-Tracheen erfahren durch Frost im Sommer keinerlei nachträgliche Veränderung, Form und Größe sind daher unauffällig. Charakteristisch sind Tracheen mit leicht vergrößerter Querschnittsfläche im Anschluss an das traumatisierte Gewebe. In der Holzanatomie der Versuchseichen, an denen Frost zu Beginn des Blattknospenbruchs simuliert worden war (Variante 1), finden sich verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F). Die Ausprägung von Merkmal F ist äußerst differenziert und deutlich ausgeprägt, Abbildung 3-23 zeigt es aus einer Versuchseiche.

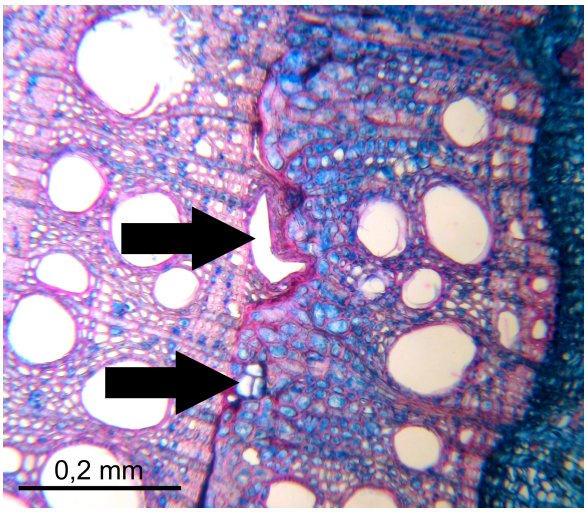


Abb. 3-23: Verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F, Pfeile) einer Frost-Eiche (Variante 1, Frost im Frühjahr) in 40 cm Stammhöhe.

Vier der fünf behandelten Versuchseichen zeigen verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen. Charakteristisch sind die sichelförmigen Frühholz-Tracheen zu Beginn des Frühholzbereiches, deren Form durch traumatisches Zellwachstum im umliegenden Grundgewebe zustande kommt (Merkmal T); die anfangs unverholzten Frühholz-Tracheen werden durch das traumatische Zellwachstum des umliegenden Grundgewebes zu einer charakteristisch sichelförmigen Struktur eingedrückt. Neben sichelförmigen Frühholz-Tracheen finden sich kollabierte Frühholz-Tracheen; diese sind in ihrer Häufigkeit geringer als die sichelförmigen. Das Auftreten beschränkt sich auf Frühholz-Tracheen mit direkter Lage zur Jahrringgrenze. Der mittlere Frühholzbereich wird durch unverholztes traumatisches Grundgewebe dominiert (Blaufärbung im Bild). Im Anschluss an dieses Gewebe finden sich Frühholz-Tracheen, die die Größe von normalen Frühholz-Tacheen haben (rechts im Bild Abb. 3-23). Der Frühholzbereich erfuhr dadurch eine beträchtliche radiale Erweiterung.

Offensichtlich charakterisiert die Merkmalskombination F und T (verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen mit traumatischem Grundgewebe) die Holzanatomie von Versuchseichen, die zu Beginn der Frühholzbildung einer Frosteinwirkung ausgesetzt waren. Nur in einem Falle wurde traumatisches Gewebe, ohne verformte oder kollabierte Frühholz-Tracheen gefunden.

Der Verlauf des diametralen Stammzuwachses vor und nach Frostbehandlung im Frühjahr ist exemplarisch in Abbildung 3-24 dargestellt.

Eine abrupte Abnahme des Stammdurchmessers um ca. 100 µm ist vom 27. auf den 28. April , in der Nacht, in der die exemplarisch gezeigte Eiche Frost ausgesetzt war, festzustellen. Die holzanatomische Veränderung (Merkmal F bzw. T), also die mechanische Zerstörung der Frühholz-Tracheen durch Kollabieren, kann aus diesen Daten interpretiert werden; so jedenfalls wäre ein rapider Volumenverlust gut zu erklären. Abbildung 3-24a zeigt einen diametralen Zuwachs von ca. 570µm am Ende der Vegetationsperiode, der hauptsächlich in der Zeit vom 24. April (DSB=3, DOY=114) bis zum 29. Juni (DSB=70, DOY=180) erreicht wird.

Die Tagesamplituden des Stammdurchmessers weisen durchgängig sehr hohe Werte von über 200 µm (bzw. 1%) auf (Abb. 3-24b). Das tägliche starke Wasserdefizit zeigt sich über die gesamte Vegetationsperiode, das durch die zerstörten Frühholz-Tracheen erklärt werden könnte.

Während die bisher betrachteten Dendrometerdaten oftmals eine sehr abrupte Änderung von einem Maximum zum nächsten zeigen, fallen bei der Frost-Eiche die Änderungen des Stammzuwachses sehr gering aus (Abb. 3-24c).

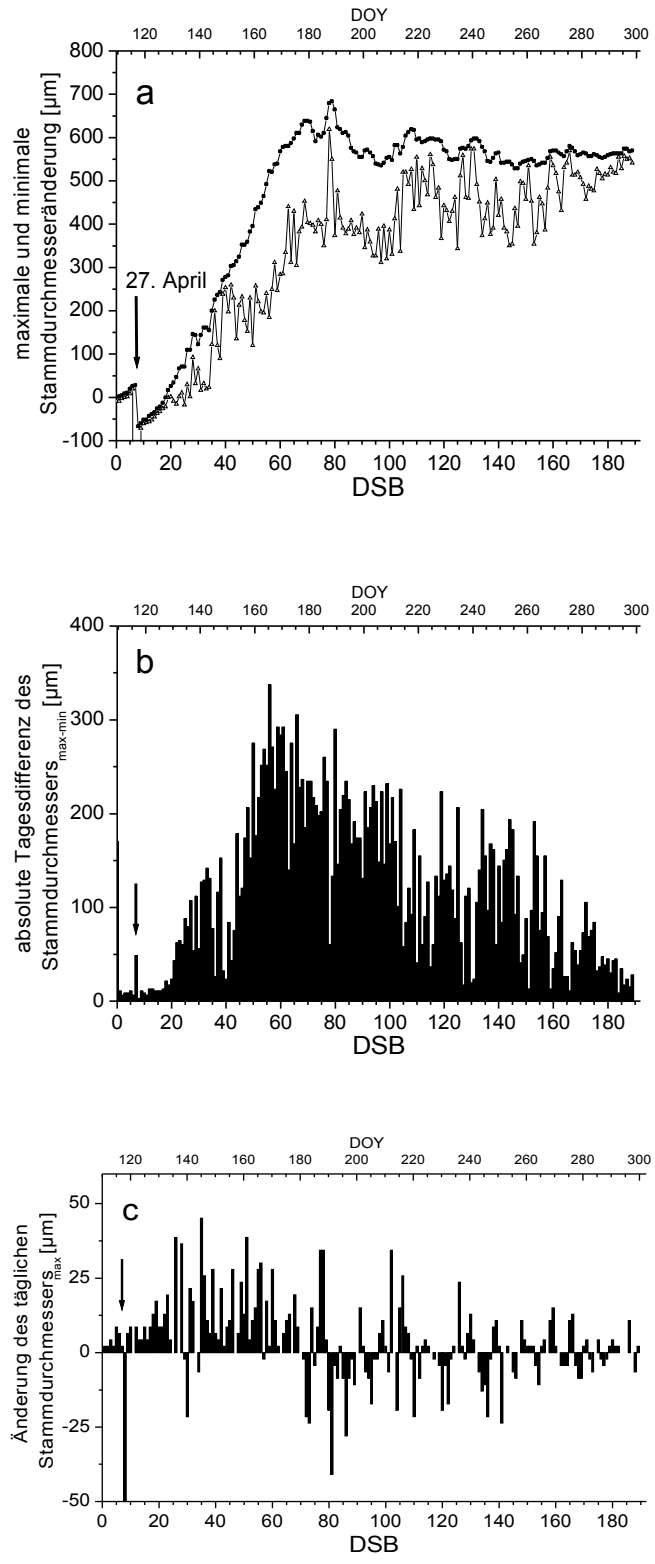


Abb. 3-24: Verhalten des Stammdurchmessers einer Versuchseiche (#3), an der am 27. April (DSB=7, DOY=117) Frost simuliert wurde (Variante 1), im Verlauf einer Vegetationsperiode. **(a)** Verlauf des täglichen maximalen (●) und minimalen (Δ) Durchmessers, **(b)** der absoluten Tagesdifferenz zwischen maximalem und minimalem Durchmesser, **(c)** der täglichen Änderung des maximalen Durchmessers absolut zum Vortag. - ↓=Frost; DSB=Tag nach Knospenbruch (Day since budbreak); DOY=Tag im Jahr (Day of Year); DOY 100=10.Apr.; DOY 150=30.Mai; DOY 200=19.Juli; DOY 250=7.Sept.; DOY 300=27.Okt.

Im Vergleich zur Kontroll-Eiche zeigt frostbehandelte Eiche einen um ca. 1900 µm geringeren Zuwachs. Auch der Wasserhaushalt dieser Versuchseiche ist über die gesamte Vegetationsperiode sehr angespannt. Dies zeigt sich sehr deutlich in der Zeit nach dem 1. September (DOY=244), in der die Tagesdifferenzen zwischen Maximum und Minimum deutlich über 100 µm liegen und bei der Kontroll-Eiche deutlich darunter.

3.7.6 Auswirkung von simulierter Überflutung auf Holzanatomie und diametralen Zuwachs

Die Hochwasser-Simulationen sind in zwei Varianten durchgeführt worden: während der Frühholzbildung (Variante 1) und während der Spätholzbildung (Variante 2).

Die Wirkung von Hochwasser im Frühjahr und Sommer manifestiert sich unterschiedlich in der Holzanatomie, wobei die Befunde für die behandelten Eichen sehr homogen sind. So zeigt sich eine deutliche Reduzierung der Tracheen-Querschnittsfläche charakterisieren lässt (Merkmal SEV) innerhalb der selben Eiche (Abb. 3-25). Bildanalytische Messungen belegen außerdem die Reduzierung der Tracheen-Querschnittsfläche gegenüber den Kontroll-Eichen (siehe Kapitel 3.8).

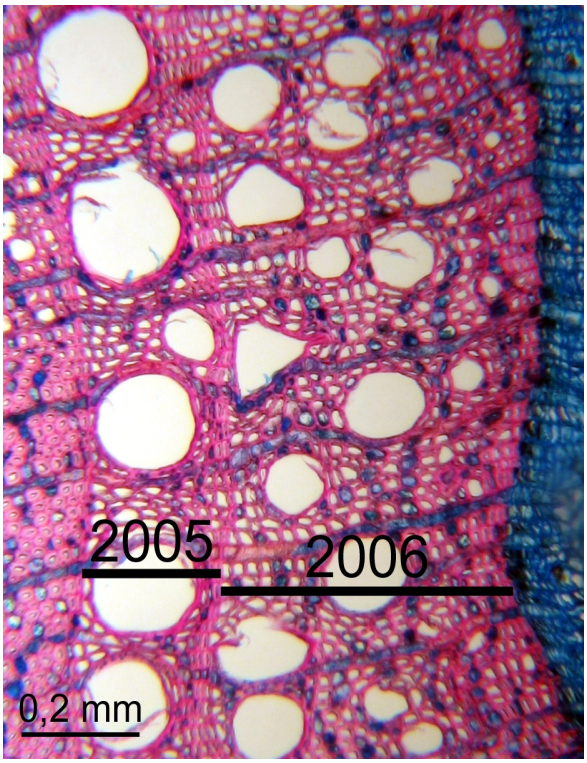


Abb. 3-25: Schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV) in einer Hochwasser-Eiche (Variante 1, Hochwasser im Frühjahr) in 20 cm Stammhöhe im Versuchsjahr 2006.

Die Frühholz-Tracheen des ein- bis zweireihigen Frühholzes dieser Versuchseichen weisen - unabhängig von der Überflutungsdauer (4, 8 oder 12 Wochen) - diese markante holzanatomische Veränderung auf.

Acht von insgesamt zehn Versuchseichen bildeten das Merkmal SEV aus. In 90 % der Fälle tritt dieses Merkmal in Kombination mit einer Deformierung der Frühholz-Tracheen auf (Merkmal DEV). Dieses Merkmal zeigt einen charakteristischen triangel-förmigen Querschnitt (Abb. 3-26).

Derartige Formveränderungen treten bei 10 % der Tracheen auf – ebenfalls unabhängig von der Überflutungsdauer und zwar in 90% der Versuchseichen. In der zweiten Frühholzreihe finden sich nur sehr selten deformierte Frühholz-Tracheen, im Spätholz dagegen keine.

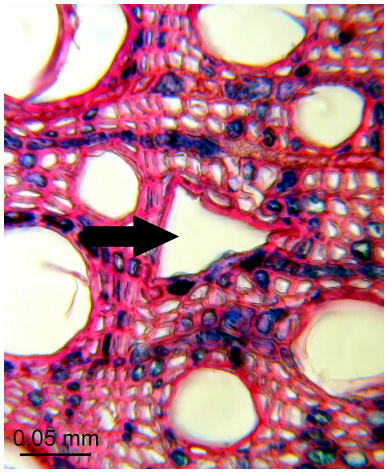


Abb. 3-26: Deformierte Frühholz-Trachee (Merkmal DEV, Pfeil) in einer Hochwasser-Eiche (Variante 1, Hochwasser im Frühjahr) in 20 cm Stammhöhe.

Zellen des Frühholzes weisen ansonsten keine auffälligen Veränderungen auf: Sekundärwanddicke, parenchymatisches Gewebe, Libriformfasern und Fasertracheiden erscheinen unverändert.

Abbildung 3-27 gibt Einblick in die Veränderung holzanatomischer Strukturen bei einer Versuchseiche, an der Überflutung im Sommer (Beginn 1. Juni) simuliert worden ist.

Deutlich zu sehen sind die stark vergrößerten Tracheen im Spätholz des Jahres 2006, die wie ein erneuter Frühholzbereich wirken (Merkmal G). Die Querschnittsfläche der vergrößerten Spätholz-Tracheen fällt zwar deutlich geringer aus als die der Frühholz-Tracheen, aber wesentlich größer als bei typischen Spätholz-Tracheen.

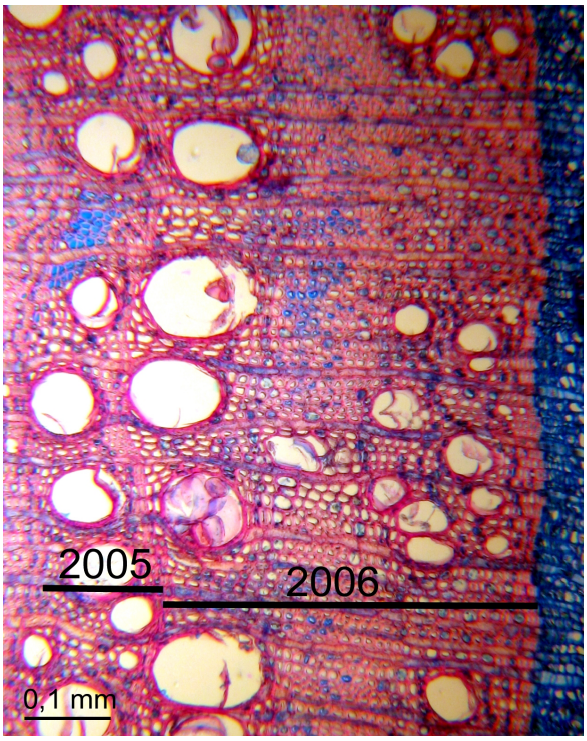


Abb. 3-27: Vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G) in einer Hochwasser-Eiche (Variante 2, Hochwasser im Sommer) in 40 cm Stammhöhe im Versuchsjahr 2006.

Vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G) finden sich ausschließlich in Versuchseichen, an denen Sommer-Hochwasser simuliert worden ist. Im Gegensatz zu allen anderen holzanatomischen Anomalien, die in Eichen des Freiland-Experiments festgestellt werden konnten, ist das Merkmal G geprägt durch eine äußerst lokale Ausbildung über den Stammquerschnitt. Ebenso tritt dieses Merkmal nur im Bereich des Stammes auf, der unter Wasser stand. Auch lässt sich dieses Merkmal G auch nur in vier von zwölf Versuchseichen finden.

Im Stammquerschnitt von Versuchseichen, an denen von Juli bis August (Variante 2) Hochwasser simuliert worden ist, zeichnen sich vereinzelt Dichtebänder am Ende des Spätholzes (Merkmal E) ab. Merkmal C bzw. Merkmal D ist bei keiner „Hochwasser-Eiche“ aufgetreten. Merkmal SEV, DEV und G finden sich ausschließlich im überfluteten Stammbereich.

Um an den Versuchseichen der Hochwasser-Simulationen die absolute Entwicklung des Stammdurchmessers verfolgen zu können, wurde auch hier auf die Methode der Dendrometrie zurückgegriffen. Da die holzanatomischen Merkmale, wie gerade beschrieben, ausschließlich im überfluteten Stammbereich zu finden waren, wäre eine Installation der Dendrometer unter Wasser sehr hilfreich gewesen. Es sei an dieser Stelle daher eine Methodendiskussion erlaubt: Eingelagert in ein handelsübliches „Präservativ“ oder Luftballon könnte die Anbringung von Dendrometern wasserdicht und billig erfolgen und in zukünftigen Versuchen aufzeigen zu welchem Zeitpunkt der Zelldifferenzierung die Merkmale entstehen und wie das Dickenwachstum verläuft.

Abbildung 3-28 zeigt die Messungen exemplarisch für eine Hochwasser-Eiche, an der 92 Tage Hochwasser (Variante 1) simuliert worden ist.

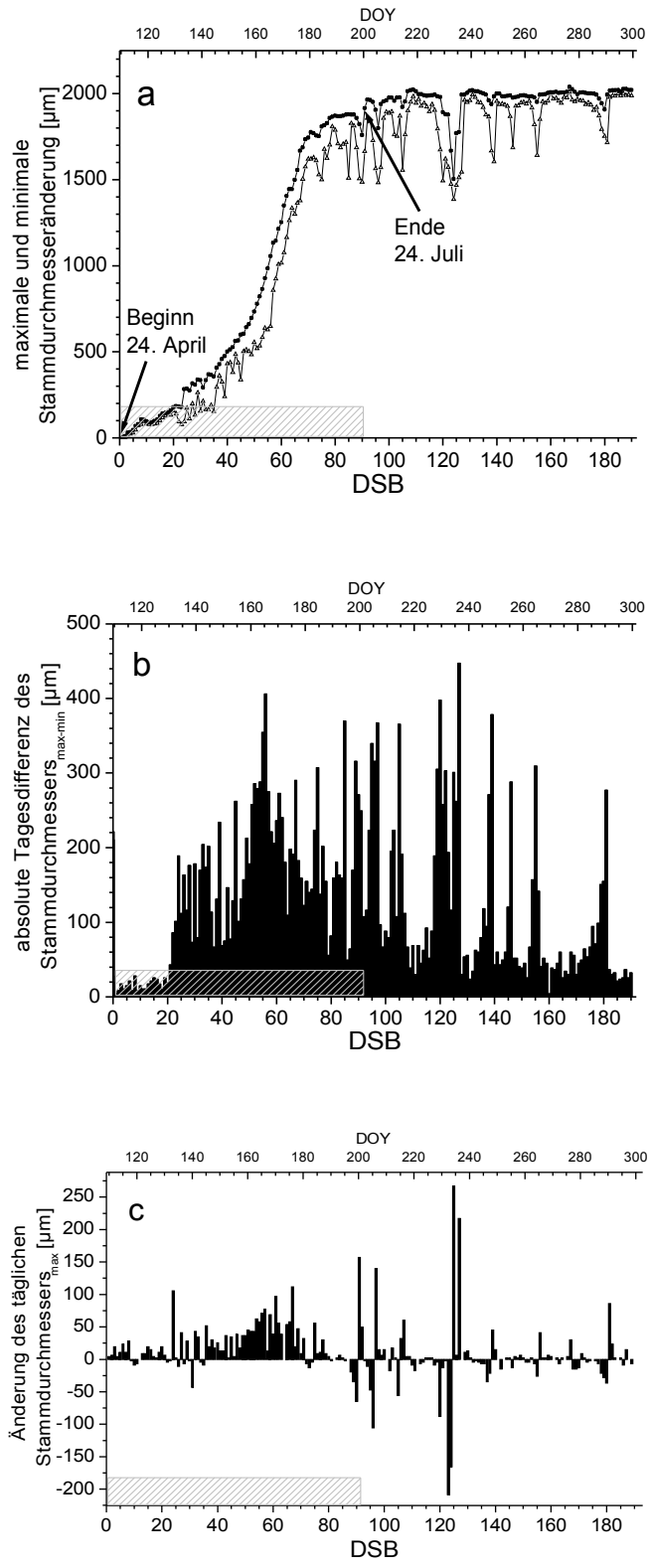


Abb. 3-28: Verhalten des Stammdurchmessers einer Versuchseiche (#20), an der vom 24. April (DSB=0 ,DOY=114) bis zum 24. Juli (DSB=91, DOY=205) Hochwasser (92 Tage) simuliert wurde (Variante 1), im Verlauf einer Vegetationsperiode. **(a)** Verlauf des täglichen maximalen (●) und minimalen (∆) Durchmessers, **(b)** der absoluten Tagesdifferenz zwischen maximalem und minimalem Durchmesser, **(c)** der täglichen Änderung des maximalen Durchmessers absolut zum Vortag. - ↓=Beginn/Ende Hochwasser-Versuch; schraffierter Balken=Hochwasserdauer; DSB=Tag nach Knospenbruch (Day since budbreak); DOY=Tag im Jahr (Day of Year); DOY 100=10.Apr.; DOY 150=30.Mai; DOY 200=19.Juli; DOY 250=7.Sept.; DOY 300=27.Okt.

In Abbildung 3-28a ist der Verlauf der Stammdurchmesseränderung aufgezeigt. Die simulierte Überflutung erstreckte sich vom Tag des Knospenbruchs am 24. April (DSB=0, DOY= 114) bis zum 24. Juli (DSB=91, DOY= 205) über eine Dauer von 92 Tagen. Für alle Eichen aus den Hochwasser-Versuchen ist ein relativ breiter Stammzuwachs kennzeichnend, der jedoch im Bereich des Zuwachses von Kontroll-Eichen liegt. Dickenzuwachs erfolgt hauptsächlich zwischen dem 24. April (DSB=0, DOY=114) und dem 6. Juli (DSB=78, DOY=187) statt – innerhalb von 79 Tagen während der simulierten Überflutung. Am Ende der Vegetationsperiode hatte die Hochwasser-Eiche einen diametralen Stammzuwachs von ca. 2000µm erreicht.

Die tägliche Stammdurchmesseränderung (Abb. 3-28b) nimmt Werte von teilweise über 350µm (bzw. über 2% bezogen auf den gesamten Stammdurchmesser) an - und damit ähnliche Tagesamplituden wie bei der Kontroll-Eiche. Am Ende der Vegetationsperiode (und nach der Simulation), liegen die täglichen Differenzen geringfügig höher als bei der Kontroll-Eiche.

Die absolute Stammdurchmesseränderung bezogen auf den Vortag geht aus Abbildung 3-28c hervor und zeigt sogar Schrumpfungen des Stammes in vereinzelten Phasen nach der Simulation. Der Verlust des Wassers im Stammbereich scheint teilweise so groß zu sein, dass er über Tage hinweg nicht wieder aufgefüllt werden kann. Besonders deutlich tritt dies zwischen dem 16. und 24. August (DSB=119-127, DOY=228-236) auf. In dieser Phase schrumpft der Stamm mehrmals um ca. 150µm (bzw. ca. 1% bezogen auf den gesamten Stammdurchmesser); dies kann in ähnlichem Ausmaß nur bei der Trockenstress-Eiche festgestellt werden, wofür auch das aufgetretene Dichteband spricht. Möglicherweise war die Pflanze durch das Sommerhochwasser verwöhnt und konnte an Schönwetter-Tagen ihre Transpiration nicht genügend drosseln.

Vergleicht man diese Dendrometer-Messungen mit denen der Kontroll-Eiche, so fallen nur geringe Unterschiede auf. Erst gegen Ende der Vegetationsperiode (nach 7. September, DOY=250) finden sich einzelne Tage, an denen die Hochwasser-Eiche einen angespannteren Wasserhaushalt zeigt.

3.8 Einfluss von simuliertem Hochwasser (Überflutung) auf die Querschnittsfläche der Frühholz-Gefäße in Eichen des Freiland-Experiments

Wie aus Abbildung 3-25 und 3-26 erkennbar, beeinflusst Frühjahrs-Hochwasser die Größe von Tracheen. Um dies näher zu untersuchen, wurden die Frühholz-Gefäßflächen von hochwasser-behandelten und Kontroll-Eichen bildanalytisch vermessen (zur Methodik siehe Kapitel 2.11.2). Zur besseren Vergleichbarkeit flossen ausschließlich die Ergebnisse zu Frühholzgefäßen aus der ersten Frühholzreihe ein, da auf sie die Überflutungsdauer keinen Einfluss hatte (Abb. 3-29).

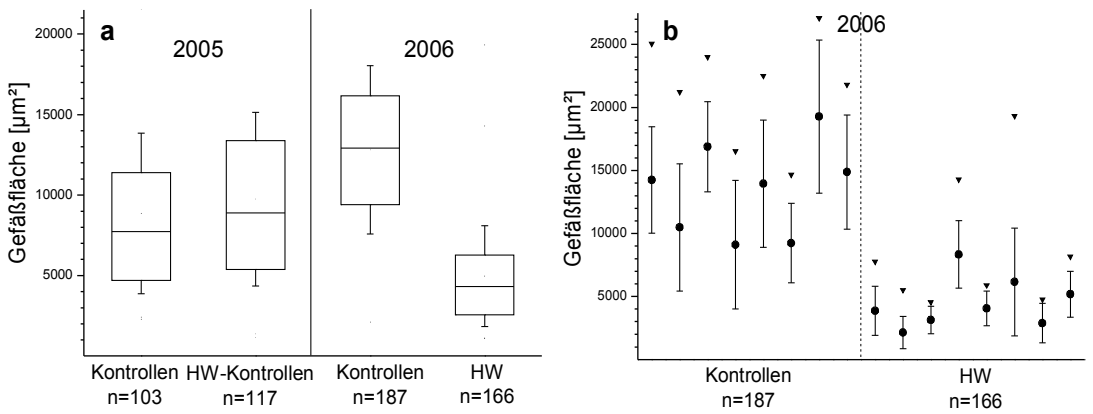


Abb. 3-29: Querschnittsfläche der Frühholz-Gefäße in Kontroll- und Hochwasser (HW)-Eichen in 20 cm Stammhöhe. **(a)** Box-Whisker-Plot (Median, 25-75% Intervall und Standardabweichung) der Gefäßflächen von Kontroll- und HW-Eichen in den Jahren 2005 und 2006. **(b)** Messungen der Querschnittsflächen von einzelnen Kontroll- und HW-Eichen im Versuchsjahr 2006. - ● = Median mit Standardabweichung; ▼ = max. Gefäßfläche der Einzelbäume; n = Gesamtanzahl der vermessenen Frühholz-Gefäße.

In Abbildung 3-29a sind der Median bzw. 25 bis 75% des Wertebereichs im Jahr vor dem Experiment (2005) und dem Versuchsjahr (2006) aufgeführt. Im Jahr 2005 (vor Behandlung) liegt zwischen diesen beiden Gruppen erwartungsgemäß kein signifikanter Unterschied vor (t-Test: $p = 0{,}21$). Die mediane Gefäßfläche der Kontroll-Eichen im Versuchsjahr 2006 ist mit über 13000 µm² um ein dreifaches größer als bei den Hochwasser-Eichen (4000 µm²); der 25 bis 75% Wertebereich fällt bei den Hochwasser-Eichen markant enger als bei den Kontrollen aus.

Vergleicht man die Gefäßflächen aus der ersten Frühholzreihe zwischen den Kontroll- und Hochwasser-Eichen nach Behandlung, so zeigen auch die mittleren Tracheen-Querschnittsflächen der Hochwasser-Eichen (Abb. 3-29b) durchweg geringere Werte als die der Kontroll-Eichen (t-Test: $p = 0{,}00003$). Die Standardabweichungen fallen für die Hochwasser-Eichen enger aus als in den Kontroll-Eichen. Die mittleren Gefäßflächen liegen um den Faktor neun niedriger (2130 bis 8330 µm²) und die maximale Gefäßfläche um den Faktor sechs.

Um einen Überblick über die Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße entlang der Stammhöhe im Jahr 2005 und 2006 zu erhalten, sind exemplarisch eine Kontroll- und eine Hochwasser-Eiche in 20 cm Schritten vermessen worden (Abb. 3-30).

Die mediane Gefäßfläche der Kontroll-Eiche (Abb. 3-30a, b) nimmt tendenziell mit steigender Stammhöhe ab; im Jahr 2005 (a) liegen die Werte geringfügig niedriger als 2006 (b). Grundsätzlich verhalten sich alle drei Kontrollen (a, b, c) einheitlich. Die mediane Gefäßfläche der Hochwasser-Eiche zeigt nach der Behandlung im Jahr 2006 (d) einen deutlich veränderten entlang der Stammhöhe gegenüber dem Kontrolljahr 2005 (c). Gefäße unterhalb des Wasserspiegels bilden eine viel geringere Querschnittsfläche aus als Gefäße oberhalb (d). Die Querschnittsflächen knapp oberhalb des Wasserspiegels sind mit 11500 µm² (Median) am Größten; mit steigender Stammhöhe sinkt diese leicht ab. In einer Stammhöhe von 20 cm, also 30 cm unter Wasser, ist diese um mehr als die Hälfte kleiner (4000 µm²) verglichen zum Vorjahr bei der selben Eiche und den anderen Kontrollen. In einer Stammhöhe von 40 cm, 10 cm unter Wasser, ist die Querschnitts-fläche ebenso kleiner, fällt aber nicht ganz so deutlich aus (7000 µm²).

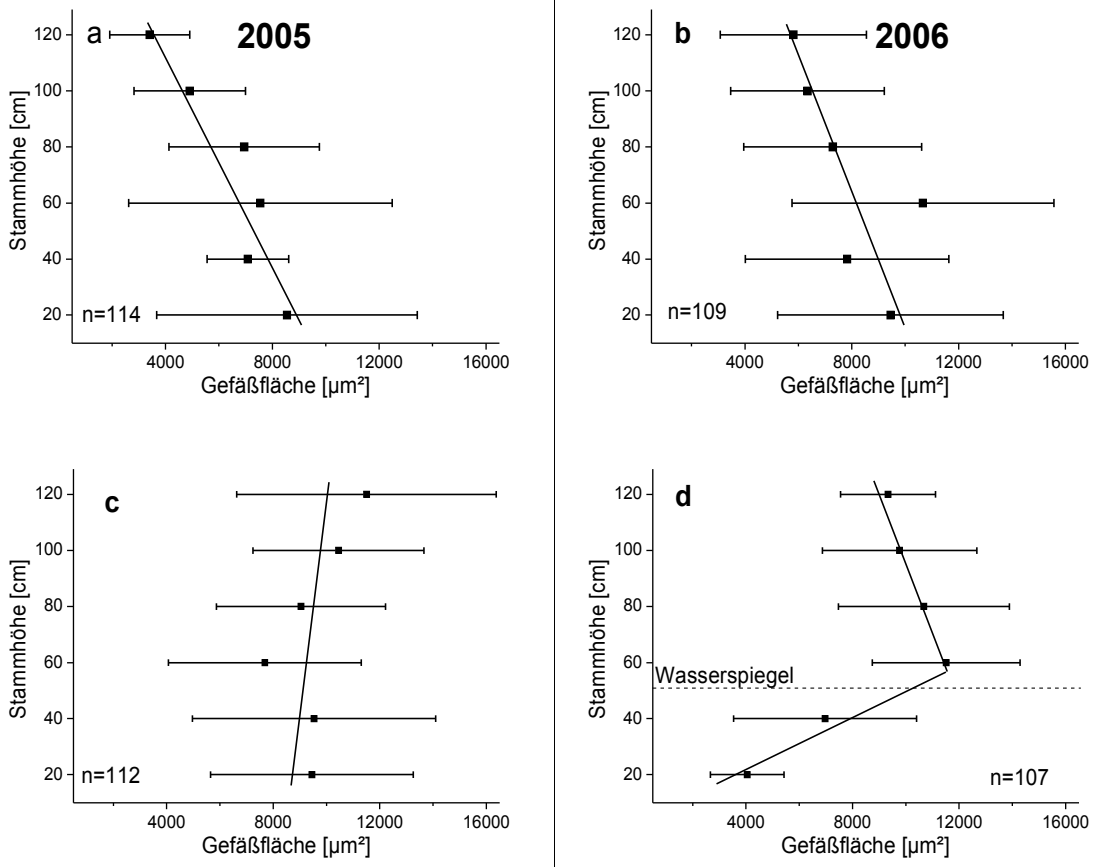


Abb. 3-30: Messung der Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße entlang der Stammhöhe einer Kontroll- **(a, b)** und Hochwasser-Eiche **(c, d)**, jeweils in den Jahren 2005 vor Behandlung **(a, c)** und im Versuchsjahr 2006 **(b, d)**. Die vertikal verlaufenden Linien zeigen den Trendverlauf an. Nach der Behandlung (Überflutung) sind die stark verringerten Gefäßflächen im Stammbereich unterhalb des Wasserspiegels der Hochwasser-Eiche **(d)** sehr gut zu erkennen, während die Kontroll-Eiche den gleichen Trendverlauf zeigt wie im Vorjahr. - ■ = Median mit Standardabweichung; n = Gesamtanzahl der vermessenen Gefäße je Eiche.

3.9 Vergleich der dendrometrischen Befunde aus unterschiedlichen Behandlungen

In den vorangegangenen Kapiteln sind die Ergebnisse aus den verschiedenen Versuchstypen (z.B. Frost, Trockenstress) getrennt voneinander dargestellt worden. In den folgenden Abschnitten werden sie vergleichend betrachtet, insbesondere vor dem Hintergrund des Verhaltens der Kontrollen.

3.9.1 Vergleich der Wachstumsdynamiken von Kontroll- und Versuchseichen

Um die Dynamiken der einzelnen Eichen bei unterschiedlichem individuellem Wachstum vergleichbar zu machen, musste eine Normierung der Messwerte vorgenommen werden. Hierzu wurde das Tagesmaximum am Tag des Knospenbruchs gleich Null (Prozent) und das Tagesmaximum nach „Sättigung“ des Wachstums etwa am 175. Tag nach Knospenbruch gleich 100 (Prozent) gesetzt. Die folgende Abbildung 3-31 macht deutlich, wie sich die Wachstumsdynamiken der Eichen aus den unterschiedlichen Versuchstypen relativ zur Kontroll-Eiche verhalten.

Aus dem Verlauf der Kurve der Kontroll-Eiche (rot dargestellt) ist ersichtlich, dass 8 Wochen nach Knospenbruch (DSB=54) die Hälfte des diametralen Zuwachses erreicht ist. Wie zu erwarten, zeigen die Wachstumsdynamiken der Versuchseichen teilweise große Unterschiede zur Kontroll-Eiche auf. Im Extremfall liegt eine Differenz von 55 Tagen für die verschiedenen Halbwertszeiten (Zeitpunkt beim Erreichen der Hälfte des Zuwachses) vor.

Die Hochwasser-Eichen (Abb. 3-31a) erreichen, von einem Ausreißer abgesehen, die Hälfte ihres diametralen Zuwachses später als die Kontroll-Eiche; im Fall einer Hochwasser-Eiche (Variante 2) drei Wochen später. Bei drei Hochwasser-Eichen verläuft die Zunahme des diametralen Zuwachses in den ersten fünf Wochen nach Knospenbruch ähnlich schnell wie bei der Kontroll-Eiche. Danach verlangsamen sich die Dynamiken für eine kurze Zeit (ca. 10 Tage) um dann erneut mit der Steigung der Kontroll-Eichen gleichzuziehen.

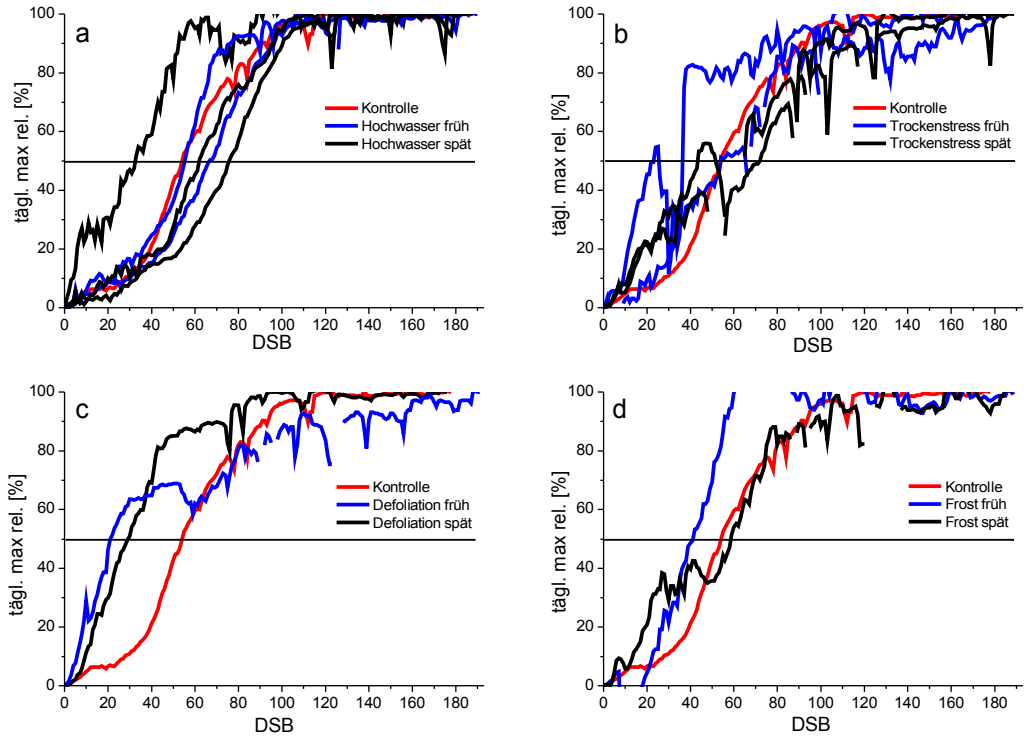


Abb. 3-31: Normierte Wachstumsdynamiken der Hochwasser-Eichen **(a)**, der Trockenstress-Eichen **(b)**, der Defoliations-Eichen **(c)** und der Frost-Eichen **(d)** gegenüber der Kontroll-Eiche. Extreme negative Daten sind aufgrund der Übersichtlichkeit entfernt worden. - rot = Kontroll-Eiche (in allen Grafiken identisch); blau = Experiment im Frühjahr (früh); schwarz = Experiment im Sommer (spät); Linie = 50% des erreichten Zuwachses; 0% entspricht Tagesmaximum am Tag des Knospenbruchs und 100% entspricht Tagesmaximum nach „Sättigung“ des Wachstums (175. Tag nach Knospenbruch).

Im Falle der Trockenstress-Eichen (Abb. 3-31b) lässt sich dies nicht so deutlich erkennen, da diese teils sehr starke Änderungen im Stammdurchmesser aufweisen. Drei dieser vier Trockenstress-Eichen liegen etwa gleich auf mit dem Trend der Kontrolle. Die vierte erreicht die Hälfte des Zuwachses einen Monat früher.

Die zwei vermessenen Defoliations-Eichen (Abb. 3-31c) liegen in ihrer relativen Dynamik deutlich – mit über drei bis vier Wochen – vor der Kontroll-Eiche. Dieser Effekt ist durch den abrupten diametralen Zuwachsstopp sofort nach Defoliation zu erklären, der nur ein kleineres Jahreswachstum zulässt.

Die Hälfte des relativen diametralen Zuwachses ist bei den Frost-Eichen zwei Wochen bzw. fast gleichzeitig mit der Kontroll-Eiche erreicht (Abb. 3-31d). Die ähnliche Dynamik der Kontroll-Eiche und der Frost-Eiche, die die Simulation in der Spät-Variante durchlaufen hat, findet seinen Grund in der Ausbildung von stark traumatisiertem Gewebe, welches im Anschluss an die Frosteinwirkung gebildet worden ist und die „wahre“ Wachstumsdynamik daher stark beeinflusst (vergl. die anatomischen Befunde in Abb. 3-22 und Abb. 3-23).

Bei dieser relativen Betrachtung darf nicht übersehen werden, dass Behandlungsstress im Allgemeinen zu einer Verringerung des Jahreszuwachses führte und damit schnellere Halbwertszeiten zur Folge haben kann.

3.9.2 Die Wirkung von Wasserdefizit (Luft) auf den diametralen Stammzuwachs

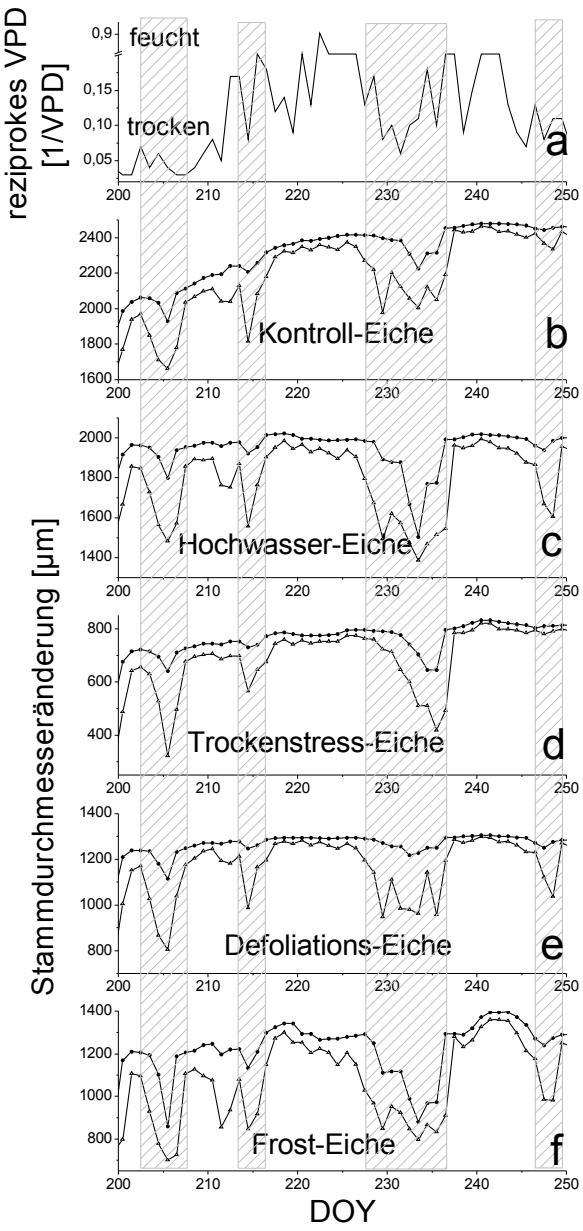


Abb. 3-32: Tägliche Stammdurchmesseränderung zwischen dem 19. Juli (DOY=200) und dem 7. September (DOY=250) einer Kontroll- **(b)**, Hochwasser- **(c)**, Trockenstress- **(d)**, Defoliations- **(e)** und Frost-Eiche (f) im Vergleich zum täglichen Wasserdefizit der Luft am Standort reziprok (1(VPD) aufgetragen **(a)** - ● = Tagesmaximum; ∆ = Tagesminimum; Balken = Phasen synchroner Änderungen.

Während die dendrometrisch analysierten Versuchseichen bis Ende Juni (DOY=181) behandlungsbedingt kaum Gemeinsamkeiten in ihren Änderungen des Stammdurchmessers aufweisen, ist in der Periode mit ausreichend zeitlichem Abstand nach Versuchseingriff ein oftmals gleichsinniger Verlauf häufig zu finden. In Abbildung 3-32 ist daher der Verlauf von Tagesmaxima und -minima der Stammdurchmesseränderung von je einer Kontroll-, Hochwasser-, Trockenstress-, Defoliations- und Frost-Eiche im Vergleich zum täglichen Wasserdefizit der Luft am Standort im Zeitraum vom 19. Juli (DOY=200) bis 17. September (DOY=250) dargestellt.

Die vier schraffierten Flächen zeigen Phasen gleichsinniger Abnahme des Stammdurchmessers bzw. großer Tagesamplituden. Betrachtet man das Wasserdefizit – aufgrund der Vergleichbarkeit reziprok dargestellt –, so gehen

geringe Werte des Wasserdefizits (sehr trocken) einher mit einem deutlichen Absinken des Stammdurchmessers im Tagesverlauf bzw. großen Amplituden zwischen Tagesmaxima und -minima. Bei steigenden Werten des reziproken Wasserdefizits steigt der Stammdurchmesser bzw. werden die Amplituden wieder geringer.

Die Verläufe der täglichen Maxima von Trockenstress- und Defoliations-Eiche verhalten sich in dem aufgezeigten Zeitraum sehr ähnlich zur Kontroll-Eiche; sie zeigen selbst bei sehr trockenen Bedingungen nur geringe Einbrüche (Abb. 3-32b, d, e). Die Hochwasser-, und, im besonderen Maße, die Frost-Eiche weisen in dieser Periode sehr deutliche Abnahmen des Stammdurchmessers auf, was in der Phase um DOY=230 besonders gut zu erkennen ist (Abb. 3-32c, f); der ohnehin schon angespannte Wasserhaushalt dieser Eichen gipfelt in einer sehr ausgeprägten Schrumpfung des Stammdurchmessers.

Ebenso ersichtlich ist, dass die Verläufe der täglichen Minima bei allen Versuchseichen sehr homogen in den vier markierten Phasen absinken (um 350 - 500 µm) – unabhängig von der vorausgegangenen Behandlung. Bezogen auf die individuellen Stammdurchmesser entspricht dies einer Schrumpfung von 2 -3 Prozent.

3.9.3 Vergleichende Betrachtung der Auswirkung experimenteller Behandlung auf Parameter des Stammdurchmessers

In diesem Kapitel werden Unterschiede in den Reaktionen von Kontroll- und Versuchseichen betrachtet (Tab. 3-5).

Alle Versuchseichen zeigen markante Unterschiede in den aufgeführten Parametern verglichen mit den Kontroll-Eichen. Betrachtet man obige Tabelle, so fällt auf, dass bei allen Versuchseichen bezüglich der Holzanatomie deutliche Unterschiede zu den Kontrollen vorliegen. Die relativ geringen Unterschiede in den aufgeführten Parametern der Hochwasser-Eichen und den Kontrollen sind erstaunlich – unabhängig, ob im Frühjahr (Variante 1) oder Sommer (Variante 2) die Überflutung simuliert wurde –, und belegen die sehr gute Anpassung der Eichen (*Quercus robur*) an Hochwasser. An Versuchseichen, die Frost (Frühjahr) ausgesetzt worden sind, finden sich die meisten Unterschiede – bezogen auf die Kontrollen. Die relative Stammdurchmesseränderung (bezogen auf den Vortag; in Tabelle 3-5 als Tag-zu-Tag StammØänderung rel. aufgeführt) zeigt vor allem bei den Frost- und Trockenstress-Eichen sehr deutliche Abweichungen zu den Kontrollen.

Tab. 3-5: Vergleich von Versuchs- und Kontroll-Eichen unterschiedlicher Versuchstypen hinsichtlich verschiedener Parameter. - Plus(+) = markanter Unterschied; Minus (-) = kein markanter Unterschied; ? = Unterschied uneinheitlich; DF = Defoliation / Frühjahr; DS = Defoliation / Sommer; TSF = Trockenstress / Frühjahr; TSS = Trockenstress / Sommer; FF = Frost / Frühjahr; FS = Frost / Sommer; HWF = Hochwasser / Frühjahr; HWS = Hochwasser / Sommer.

Unterschiede zu Kontrolleichen								
Vergleich zu Kontrollen	**DF**	**DS**	**TSF**	**TSS**	**FF**	**FS**	**HWF**	**HWS**
Holzanatomie	+	+	+	+	+	+	+	+
Gesamtringbreiten-Zuwachs	?	?	?	?			+	+
Spätholz-Zuwachs	+	+	+	+	+	+		
Frühholz-Zuwachs					+	?	+	
diametraler Zuwachs abs.	+	+	+	+	+	+		?
tägl. Δ StammØänderung rel.			+	+		+		
Tag-zu-Tag StammØänderung rel.	+		+	+	+	+		
Zuwachsdynamik	+	+			+			+
Σ markante Unterschiede (+)	**5**	**4**	**5**	**5**	**6**	**5**	**3**	**3**

Die Auswirkungen der Versuchsbehandlung auf den diametralen Stammzuwachs zwischen Kontroll-Eiche (in den vier verschiedenen Zuwachsphasen) und Versuchseichen sind in Abbildung 3-33 verdeutlicht.

Die täglichen absoluten Stammzuwächse der Versuchseichen unterscheiden sich teils erheblich von der Kontroll-Eiche; blaue und schwarze Punkte (Versuchseichen) decken sich kaum mit den roten Punkten der Kontroll-Eiche, was einem sehr geringem Zusammenhang entspricht. In der ersten Wachstumsphase (DSB=0-30) bestehen noch große Gemeinsamkeiten in den Zuwachsdynamiken zwischen Versuchseichen und der Kontroll-Eiche. Spätestens ab der zweiten Wachstumsphase (ab DSB=31), treten die Unterschiede deutlich hervor. Die Hochwasser-Eichen (Abb. 3-33a) verlangsamen ihr Wachstum in der zweiten und dritten Phase (DSB=31-100) etwas, bevor es in der vierten Phase (DSB=101-180) parallel zu der Kontroll-Eiche, jedoch auf tieferem Niveau, verläuft.

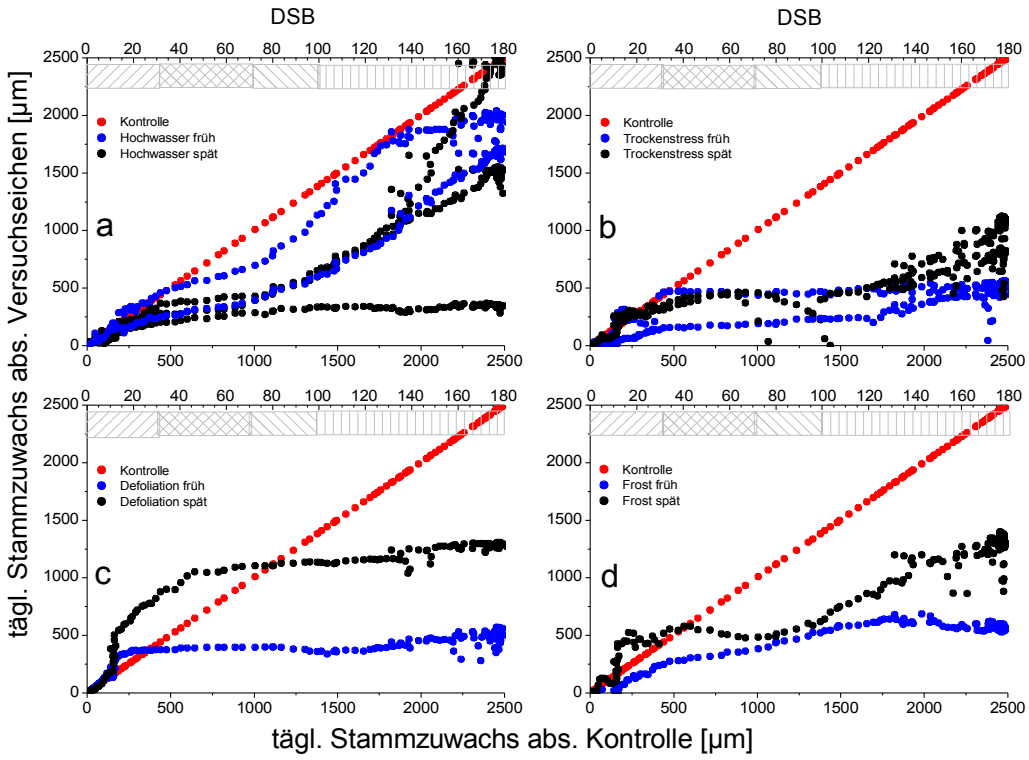


Abb. 3-33: Vergleich des täglichen absoluten Stammzuwachses (Tagesmaximum-Werte) zwischen einer Kontroll-Eiche (rot, 1:1 Beziehung) und Hochwasser- **(a)**, Trockenstress- **(b)**, Defoliations- **(c)** und Frost-Eichen **(d)** unterteilt in die Varianten 1 (Frühjahr = früh, blau) und 2 (Sommer = spät, schwarz). - Jeder Punkt entspricht 1 Tag seit Beginn des Knospenbruchs (DSB); schraffierte Balken = Phasen (1-4) mit unterschiedlicher diametraler Zuwachsdynamik der Kontroll-Eiche (aus Abb. 3-18).

Die Eichen der Trockenstress-, Defoliations- und Frost-Simulationen (Abb. 3-33b-d) zeigen ab der zweiten Wachstumsphase keinerlei Gemeinsamkeiten mehr mit der Kontroll-Eiche. Der Beginn der jeweiligen Behandlung wird sehr gut durch das „Abknicken“ der Punktefolge deutlich und belegt physiologische Veränderungen, die sich in den unterschiedlichen Wachstumsdynamiken widerspiegeln. In nahezu allen Fällen wächst die Kontrolle besser.

Aus Abbildung 3-33 ist eine Verschiebung der Wachstumsphase zwischen den Hochwasser-Eichen und der Kontrolle-Eiche zu erkennen, welche in Abbildung 3-34 näher untersucht wird: Unterschiede zwischen Hochwasser-Eichen (Variante 1 und 2) bzw. einer Kontroll-Eiche hinsichtlich Beginn, Ende und Dauer des diametralen Stammzuwachses

als Index (11-tägige Glättung) vom Tag des Knospenbruchs bis 140 Tage danach. Die Anzahl in Tagen kann aus der eingefügten Tabelle entnommen werden.

Mit einer Dauer von ca. 80 Tagen – mit einer Ausnahme – lässt sich hinsichtlich des diametralen Zuwachses kein Unterschied zwischen den Hochwasser-Eichen und der Kontroll-Eiche erkennen. Wird in Betracht gezogen, nach wie viel Tagen seit Knospenbruch (DSB) dieser statt findet, wird der Unterschied deutlich: Die jeweiligen Maxima werden bis zu einem Monat später erreicht (10 bis 34 Tage) und sind damit deutlich verzögert.

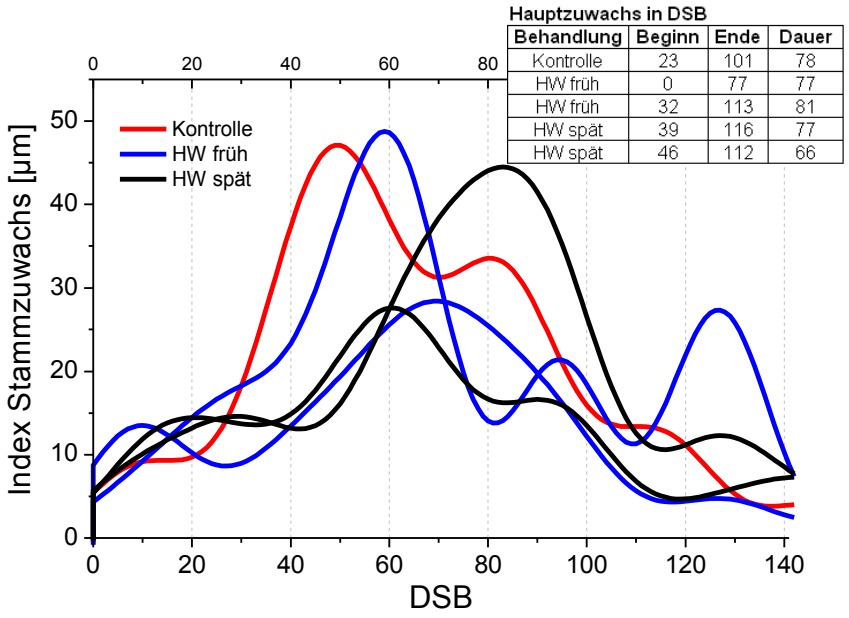


Abb. 3-34: Stammzuwachs der Hochwasser-Eichen (blau = HW früh, schwarz = HW spät) im Vergleich zu einer Kontroll-Eiche (rot). Die Daten wurden mit einem gleitenden Mittel von 11 Tagen geglättet (Index). Die Tabelle gibt den Beginn und das Ende des erreichten diametralen Zuwachses in Tagen nach Knospenbruch und die Zuwachsdauer in Tagen an. - DSB=Tag nach Knospenbruch; HW früh= Hochwasser/Frühjahr (Variante 1); HW spät=Hochwasser/Sommer (Variante 2).

3.10 Holzanatomische Anomalien in rezenten Eichen und mögliche Zusammenhänge mit biotischen und abiotischen Umweltereignissen (Rezent-Studie)

Das Wachstum der Bäume in radialer Richtung (Jahrringwachstum) wird u. a. sehr stark durch die Umwelt geprägt. Hierbei spielen verschiedenste biotische Faktoren, wie z.B. Insektenkalamitäten, und abiotische Faktoren, wie z.B. Frost, Trockenheit und Hochwasser eine wesentliche Rolle. Die folgenden Kapitel beschreiben die möglichen Veränderungen, die diese in der Holzanatomie derzeit lebender Eichen (Rezent-Studie) hinterlassen haben und ob sich diese über die gezielten Versuche ließen (Kapitel 3.7).

Bei der Auswertung sind in erster Linie solche Jahre zum Tragen gekommen, die als sogenannte „Anomalie-Weiserjahre“ definiert werden konnten. Dies sind Jahre, in denen holzanatomische Veränderungen synchron an mindestens der Hälfte der rezenten Eichen eines Standortes ausgeprägt sind; die Zahlen in Klammern geben diejenigen Jahre an, die in die Auswertung eingingen.

Da eine Rekonstruktion eines spezifischen Umweltereignisses in den seltensten Fällen nur über ein einzelnes Baum-Individuum möglich ist, ist die Betrachtung von Populationen notwendig. Dies erhöht gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit, dass das zugrunde liegende Umweltereignis einer spezifischen holzanatomischen Anomalie besser zugeordnet werden kann und sich so Fehlinterpretationen vermeiden lassen; die große Anzahl an hier untersuchten Eichen (254 Individuen) lässt diese Vorgehensweise zu.

Die Ergebnisse zur Studie über die Ableitung von überregionalen, regionalen und lokalen Weiserjahren schließen daher die Rezent-Studie ab. Anschließend folgt, auf Basis aller bisher gezeigten Ergebnisse, eine Zwischenbilanz zur Verwendbarkeit von holzanatomischen Variablen für eine Klimarekonstruktion bzw. der holzanatomischen Anomalien zur Datierung von Umweltereignissen in der Vergangenheit.

Um eine Überladung mit Abbildungen zu vermeiden, sind in der Folge nur dort Grafiken gezeigt, wo sie als sinnvoll erachtet werden und für das Verständnis unabdingbar sind. Eine Grafiksammlung befindet sich im Anhang.

3.10.1 Kalamitäten durch Insektenbefall (Defoliation) und deren mögliche Folgen auf die Holzanatomie rezenter Eichen

Kalamitäten durch Schadinsekten an Eichen treten in Süddeutschland häufig auf. Typische Schadinsekten an der Eiche sind beispielsweise der Grüne Eichenwickler (*Tortrix viridiana*), der Große Frostspanner (*Erannis defoliaria*) und der Schwammspinner (*Lymantria dispar*). Die Datenlage, für Jahre in denen es zu besonders starken Massenvermehrungen von Schadinsekten kam, ist äußerst lückenhaft. Für Ober- und Unterfranken liegen erst seit den 1990ziger Jahren verlässliche Daten vor (LWF – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft) und für das Gebiet des Oberrheins erst seit Mitte der 1970ziger Jahre (FVA – Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg).

Nach mündlicher Aussage von Frau Dr. G. Lobinger (LWF) führt insbesondere witterungsbedingter „Kombinationsfraß“, von „frühfressenden“ (z.B. Eichenwickler, Frostspanner) und „spätfressenden“ (Schwammspinner, Prozessionsspinner) Arten bei Eichen zu Vitalitätseinbußen oder sogar Absterben. Durch einen derartigen Kombinationsfraß kann der Belaubungsgrad in den Monaten Juni und Juli unter 10 % liegen und dadurch nur eine sehr geringe Stoffproduktion während der Vegetationsperiode erzielt werden. Zwischen 1992 und 1995 kam es zur ersten Pandemie und Massenvermehrung des Schwammspinners (*Lymantria dispar*) in Europa, mit 80.000 ha Befallsfläche in Deutschland, Frankreich und Italien. Speziell in Bayern waren zwischen 1992-1994 in der Fränkischen Platte 44.000 ha Wald befallen (mündliche Mitteilung Lobinger). Auch in den südwestdeutschen Laubwäldern ist der Schwammspinner in den Jahren 1993 und 1994 in einer bis dahin unbekannten Menge aufgetreten (mündliche Mitteilung von Herrn Dr. H. Delb, FVA, 2013), so dass von einem allgemeinen Befall, höchstwahrscheinlich auch der beprobten Populationen, ausgegangen werden kann.

Blickt man in die Holzanatomie der Eichen, so ist in den Jahren 1992 bis 1994 folgendes festzustellen: Sehr vereinzelt treten Veränderungen in der Holzanatomie auf; auf keinen Fall aber kann von einer eindeutigen holzanatomischen Veränderung bezüglich Insektenkalamitäten gesprochen werden. Lediglich einzelne Eichen zeigen in diesen Jahren Veränderungen, wie beispielsweise fehlendes Spätholz (Merkmal N) oder Dichtebänder (Merkmal C).

Eine konkrete Zuordnung zwischen Insektenkalamität (Defoliation) und holzanatomischer Veränderung kann daher leider nicht getroffen werden. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass das Fehlen eines anatomischen Beleges nicht automatisch einen jahrring-analytischen Beleg (verminderte Breit) ausschließt.

Während die Untersuchung an rezenten und zumeist adulten Eichen keine Zuordnung zwischen Kalamitäten und Holzanatomie erlaubt, ist dies bei den durchgeführten Freiland-Experimenten an juvenilen Bäumen sehr wohl der Fall: Defoliation hatte einen unmittelbaren radialen Zuwachsstopp zur Folge; die Spätholzbildung fiel teils völlig aus (Merkmal N).

3.10.2 Perioden mit unterdurchschnittlichen Niederschlagsmengen (Trockenperioden) und deren mögliche Folgen auf die Holzanatomie rezenter Eichen

Inwieweit sich Perioden mit geringem bzw. völlig ausbleibendem Niederschlag – und damit Trockenstress – auf Veränderungen in der Holzanatomie rezenter Eichen auswirkten, ist Gegenstand der Untersuchung auf den folgenden Seiten.

Das Fehlen oder eine starke Reduktion des Spätholzzuwachses als Folge ausbleibender Niederschläge, kann an den untersuchten rezenten Eichen häufig und überregional beobachtet werden:

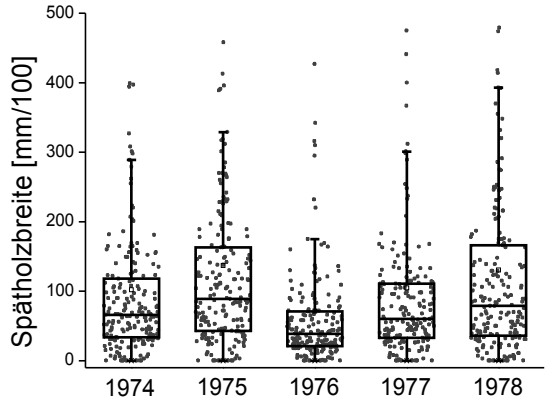


Abb. 3-35: Box-Whisker-Plot (Median, 25-75%-Range und 5-95%-Range) der Spätholzbreiten aller rezenten Eichen (• = Einzelwert) in den Jahren 1974 bis 1978.

Die Auswertung erfolgt mittels „Anomalie-Weiserjahre“. Das Auftreten häufiger „Anomalie-Weiserjahre“ und die gute Datenlage (Temperatur, Niederschlag etc.), teilweise mit täglicher Auflösung, lassen eine sehr detaillierte Auswertung zu. Im Folgenden werden die Ergebnisse an Fallbeispielen gezeigt.

Abbildung 3-35 zeigt die einzelnen Spätholzbreiten aller rezenten Eichen von 1974 bis 1978. In den zwei Jahren vor und nach 1976 lie-

gen die Median-Werte deutlich über (0,61 - 0,89 mm) dem des Jahres 1976 (0,39 mm). Dreiviertel aller untersuchten Eichen in Süddeutschland bildeten 1976 eine Spätholzbreite geringer als 0,7 mm aus; dies entspricht weniger als die Hälfte verglichen mit dem Jahr 1978 und belegt den Spätholzbreiten-Einbruch, der sich auch als holzanatomische Anomalie (Merkmal N/N+) erkennen lässt (Abb. 2-18). In Eichen an 20 Standorten kommt es bei einem Drittel der Eichen zu einer Abnahme von über 150% und bei einem weiteren Drittel von über 100 % der Spätholzbreite (verglichen mit den Jahren vor und nach 1976).

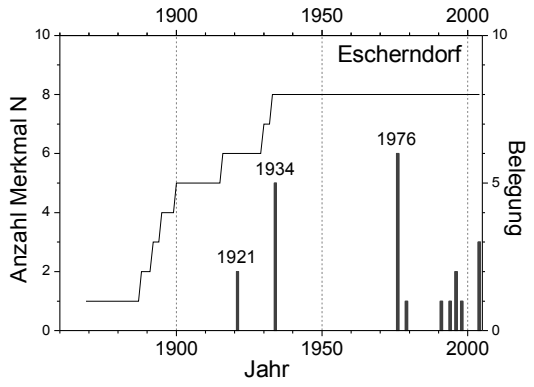


Abb. 3-36: Anomaliegramm des Merkmals N (fehlendes Spätholz) für den Standort Escherndorf (Main). Im Jahr 1934 und 1976 fällt die Bildung des Spätholzes bei 75 % der Eichen völlig aus. - Balken = Anzahl der Eichen mit Merkmalsausprägung; Linie = Belegung.

Diagramme in denen die Anzahl der Merkmale und die Belegung (Anzahl) der Bäume je Jahr aufgeführt sind, werden im Rahmen dieser Arbeit als „Anomaliegramm“ bezeichnet.

Das Anomaliegramm der Abbildung 3-36 belegt, dass am Standort Escherndorf (Main) zwischen 1870 und 2004 in den Jahren 1934 und 1976 75 Prozent der Eichen fehlendes bzw. stark reduziertes Spätholz (Merkmal N) aufweisen.

Eine mögliche Erklärung kann aus den Daten von Niederschlag, Wasserstand und Abfluss hergeleitet werden: Ein sehr hohes Niederschlagsdefizit kann im Jahr 1976 an allen Klimastationen in Süddeutschland beobachtet werden: Für das Main-Gebiet zeigen die Werte der Klimastationen durchschnittlich 47 % und für das Oberrhein-Gebiet 50 % geringeren Niederschlag als im Vergleich zum langjährigen Mittel. Dieses Niederschlagsdefizit schlägt sich in den verfügbaren Wasserstands- und Abflussdaten nieder. Abbildung 3-37 zeigt die Abflusslage exemplarisch am Pegel Schweinfurt (Main) in Jahren mit über- und unterdurchschnittlichem Abfluss.

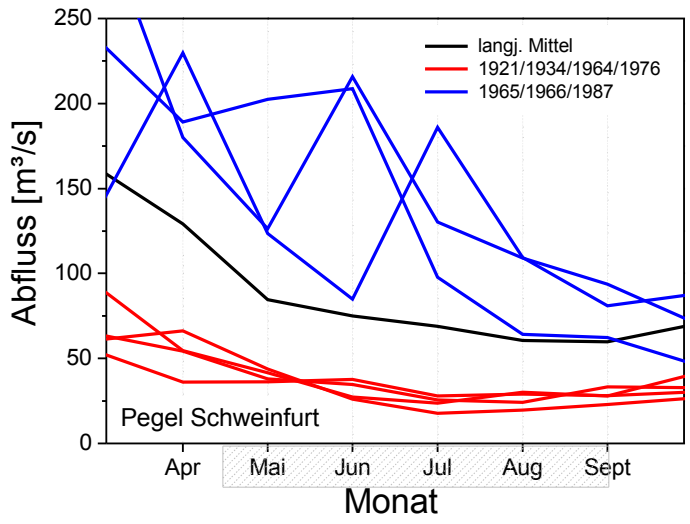


Abb. 3-37: Abfluss am Pegel Schweinfurt (Main) in den Jahren 1921, 1934, 1964, 1976 (rot) und in den Jahren 1965, 1966, 1987 (blau) im Vergleich zum langjährigen Mittel (schwarz). - schraffierter Balken = Vegetationsperiode.

Ersichtlich ist die sehr geringe Abflussmenge im Jahr 1976 und in den Jahren 1921, 1934, 1964 im Vergleich zum langjährigen Mittel. Diese Daten belegen, wie schon die Niederschlagsdaten, die extreme Trockenheit in diesem Jahr, die als mögliche Ursache für die Ausbildung des holzanatomischen Merkmals N/N+ gesehen werden kann. Die Monatsmittel-Temperaturen zeigen im Jahr 1976 durchschnittliche Werte, lediglich in den Sommermonaten Juni und Juli sind diese an den meisten Klimastationen leicht erhöht. Charakteristisch für diese extreme Trockenheit in Süddeutschland (und ganz Mitteleuropa) ist nicht nur das Niederschlagsdefizit in der Vegetationsperiode 1976, sondern vielmehr das Niederschlagsdefizit, das sich schon in den Jahren zuvor abzeichnete: Bereits Mitte des Jahres 1971 beginnt das eigentliche Niederschlagsdefizit und zieht sich bis in die Vegetationsperiode 1976 mit teils sehr geringen Niederschlagswerten hindurch.

Diese Trockenperiode ist ein überregionales Phänomen; die rezenten Eichen zeigen erst am Ende dieser sechs Jahre andauernden Periode im besonders trockenen Sommer 1976 eine eindeutige Zuwachsreduktion des Spätholzes (Merkmal N/N+).

Abbildung 3-38 verdeutlicht beispielhaft diese mehrjährige Trockenheit anhand von Niederschlags- und Wasserstandsdaten an Stationen von Rhein, Main und Donau.

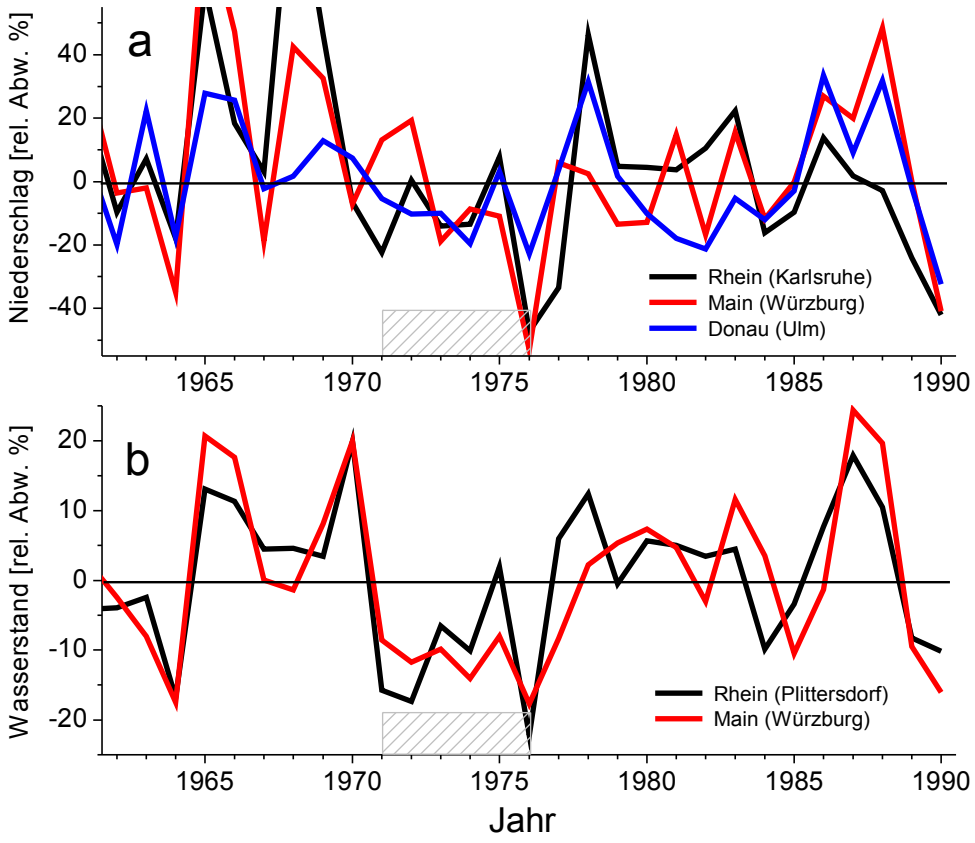


Abb. 3-38: a) Relative Abweichung des Niederschlags März bis August vom langjährigen Mittel an den Klimastationen Karlsruhe (Rhein), Würzburg (Main) und Ulm (Donau) und **b)** relative Abweichung des Wasserstandes März bis August vom langjährigen Mittel an den Stationen Plittersdorf (Rhein) und Würzburg (Main) jeweils von 1961 bis 1990. - schraffierte Balken = langanhaltende Periode mit stark negativen Abweichungen.

Der Verlauf der relativen Abweichungen des Niederschlags (März bis August) an der Station Ulm (Donau) zeigt, im Vergleich zu Karlsruhe (Rhein) und Würzburg (Main), ähnlichen Verlauf; allerdings mit nicht ganz so extremen Abweichung (a). Die relativen Abweichungen der Wasserstandsdaten (März bis August) der Stationen an Rhein und Main zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf über den Zeitraum 1961 bis 1990. Eine sechsjährige Periode (1971-1976) stark negativer Abweichungen ist in beiden Datensätzen deutlich zu

erkennen; besonders am Pegel Würzburg liegt eine durchgängig starke Abweichung vom langjährigen Mittel vor.

Auf holzanatomischer Grundlage (Merkmal N/N+) scheint sich eine solch überregionale Trockenperiode nur dann zu manifestieren, wenn diese über mehrere Jahre bzw. Vegetationsperioden ausprägt ist und es sich um eine besonders langanhaltende und extreme Phase mit sehr wenig Niederschlägen bzw. geringen Wasserständen handelt; wie es in der Region Oberrhein und Main der Fall war. Hingegen zeigen die Niederschlagsdaten an der Station Ulm (Donau) lediglich eine Phase moderater Abweichung zwischen 1971-1976. An den zwei Standorten der Donau tritt das Merkmal N als „Anomalie-Weiserjahr“ im Jahr 1976 nicht auf.

Der langanhaltenden Trockenperiode über die Jahre 1971 bis 1976 stehen Einzeljahre gegenüber, in denen die Niederschläge innerhalb eines Jahres über Monate hinweg starke Abweichungen vom langjährigen Mittel zeigen. Abbildung 3-39 zeigt exemplarisch für die Monate Februar bis Juli des Jahres 1921 die täglichen Niederschlagssummen sowie die Tageswerte der Temperatur (Maxima und Minima).

Die monatlichen Niederschlagssummen der Monate Februar bis Juli liegen deutlich unterhalb des langjährigen Monatsmittels. Im gezeigten Zeitraum fiel lediglich 30 Prozent der üblichen Niederschlagssumme. Die täglichen Temperaturen bewegten sich im Bereich der langjährigen Mittelwerte.

Analysiert man die verfügbaren Daten von Temperatur, Niederschlag und Abfluss, so finden sich ähnliche Wetteranomalien wie 1921. Vegetationsperioden, innerhalb denen es zu negativen Abweichungen vom langjährigen Mittel des Niederschlags oder des Abflusses kommt – und es sich demnach um „moderate“ Trockenheiten handelt – hinterlassen nur sehr vereinzelt ein holzanatomisches Signal in den adulten Eichen; auf keinen Fall vergleichbar mit dem Extremjahr 1976. Weitere „moderate“ Trockenjahre sind 1934 und 1964. Eine sehr kurze, extrem warme und trockene Periode – wie im August 2003 – hatte keinerlei Auswirkung auf die Holzanatomie der untersuchten Eichen.

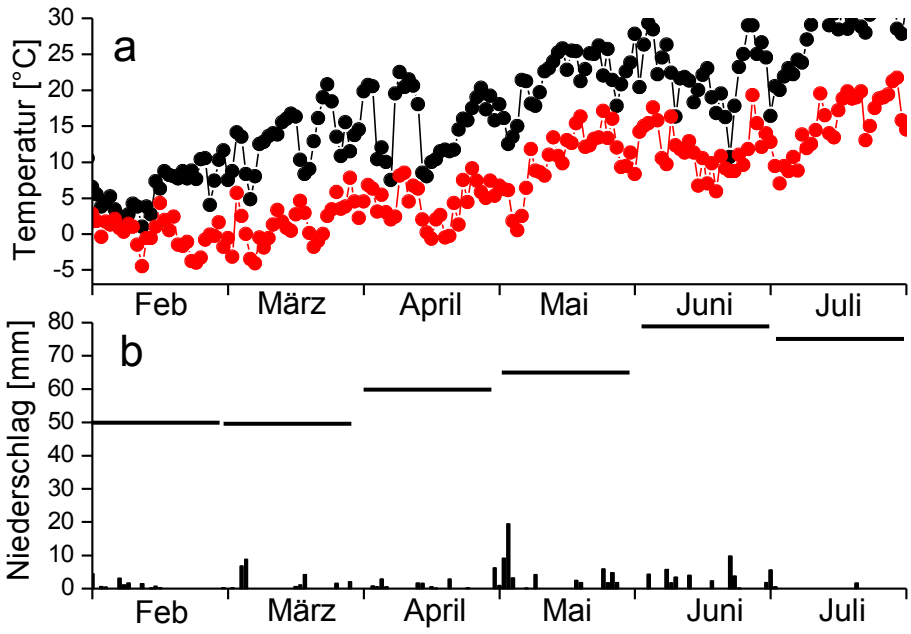


Abb. 3-39: Tagesdaten von Temperatur **(a)** und Niederschlag **(b)** für die Monate Februar bis Juli des Jahres 1921 an der Klimastation Karlsruhe. Die Querbalken zeigen die Mittelwerte der langjährigen monatlichen Niederschlagssummen. - Schwarze Punkte = Maximum-Temperatur; rote Punkte = Minimum-Temperatur; senkrechte Balken = tägliche Niederschlagssumme.

Um diesbezüglich ein abschließendes Fazit zu ziehen: Die Untersuchungen zeigen deutlich, dass eine überregionale extreme Trockenheit sich durch völliges Fehlen bzw. stark reduziertes Spätholz (Merkmal N) in Eichen aus verschiedenen Regionen auf holzanatomischer Ebene niederschlägt und damit belegt werden kann. Es muss davon ausgegangen werden, dass das Vorkommen des Merkmals N an einem einzelnen Standort andere Ursachen hat, die an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden können.

Vergleicht man die Ergebnisse aus dem Eichen-Experiment mit der Rezent-Studie, so wird deutlich, dass sie nicht konsistent sind. Trockenstress spiegelt sich in den Versuchseichen sehr deutlich als Dichteband wider, während die adulten Eichen der Rezent-Studie das radiale Wachstum (Spätholzbreite) abrupt abzuschließen scheinen. Dichtebänder als Folge von langanhaltender Trockenheit wurden in den adulten Rezent-Eichen nicht gefunden.

3.10.3 Tiefe (Extrem-)Temperaturen bzw. spontane Temperaturstürze und deren mögliche Folgen für die Holzanatomie rezenter Eichen

Die Auswertung von (extrem) tiefen Temperaturen bzw. spontanen Temperaturstürzen innerhalb der Vegetationsperiode – hier als Spätfröste bezeichnet – und deren mögliche Folgen für die Holzanatomie rezenter Eichen, sind Inhalt dieses Kapitels. An dieser Stelle soll an Folgendes erinnert werden: Das Aufzeigen der Ergebnisse erfolgt zwar anhand von „Anomalie-Weiserjahren“, das Auftreten eines spezifischen Merkmals an Standorten, die in diesem Jahr kein „Anomalie-Weiserjahr“ zeigen, schließt sich dennoch nicht aus; die Detektierung einer holzanatomischen Anomalie in einzelnen oder mehreren Eichen anderer Standorte ist sogar meistens gegeben. Ein Beispiel: Im Jahr 1913 finden sich verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen bzw. traumatisches Gewebe (Merkmal F bzw. T) in Eichen an über 60 % der Standorte. Ein „Anomalie-Weiserjahr“ konnte aber – aufgrund der Definition – nur für ein Viertel der Standorte im besagten Jahr vergeben werden.

In Kapitel 3.5.3 ist bereits erläutert worden, wie sich Perioden extrem tiefer Winterfröste auf die Querschnittsfläche der ersten Frühholz-Gefäße auswirkt: Sie fällt signifikant geringer aus. Ein Vergleich mit der Holzanatomie von Bäumen aus dem Eichen-Experiment ist nicht möglich, da diese Art der Simulation nicht durchgeführt wurde; ein experimenteller Beweis steht daher noch aus.

3.10.3.1 Tiefe (Extrem-)Temperaturen bzw. spontane Temperaturstürze zu Beginn der Vegetationsperiode (April / Mai)

Abbildung 3-40 zeigt, wie viele Eichen am Standort Reutlingen 1 (Urselberg, Schwäbische Alb) verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) im jeweiligen Jahr ausgebildet haben (Anomaliegramm).

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass im Jahr 1913 an sechs von elf Eichen diese holzanatomische Anomalie auftritt. Dieses Jahr eignet sich aus mehreren Gründen besonders gut, um die möglichen biotischen bzw. abiotischen Ursachen zu erläutern: Erstens liegen hoch-aufgelöste Wetter- und Klimadaten aus den verschiedenen Regionen Süddeutschlands für diesen Zeitraum vor und zweitens konnten historische Dokumentdaten in die Auswertung mit einbezogen werden.

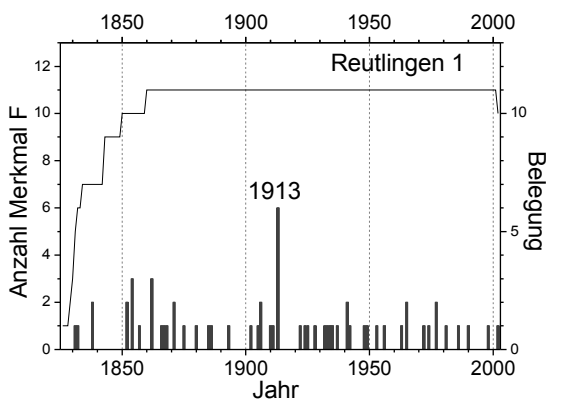


Abb. 3-40: Anomaliegramm des Standortes Reutlingen 1 (Urselberg, Schwäbische Alb). Im Jahr 1913 weisen 6 von 11 Eichen verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) auf. - Balken = Anzahl der Eichen mit Merkmalsausprägung; Linie = Belegung.

Merkmal F und/oder Merkmal T sind im Jahr 1913 besonders deutlich an den Standorten des Oberrheins (Leimersheim), der Donau (Gundremmingen 2) und der Schwäbischen Alb (Reutlingen 1, 2, 3) zu finden.

Im März 1913 war es deutlich zu warm (+2,8°C Abw. vom langjährigen Mittel, Station Karlsruhe, Rhein), während es im April und Mai kaum Abweichungen zum langjährigen Temperatur-Mittel gab (Abb. 3-41).

Bei Betrachtung der Tagesdaten wird ersichtlich, dass nach einer sehr warmen Phase von über 20°C (März), eine sehr kalte einwöchige Phase (10.-16. April) mit starken Frösten (bis -5°C) folgt. Direkt im Anschluss liegen die Tagesmaxima erneut deutlich über +25°C. Aus historischen Dokumenten ist eine außergewöhnliche Kälte überliefert. Die Quellen (http://www.wetterzentrale.de) berichten über zerstörte Baumblüten, und in Berlin war der kälteste Apriltag seit Beginn der Aufzeichnungen 1848 registriert (Tagesmittel-Temperatur -0,6°C). Nach der extremen Wärme Ende April folgt Anfang Mai ein erneuter Kälteeinbruch (3.-8. Mai); die registrierte Tagesminimum-Temperatur beträgt 1°C (an der Station Hohenheim ist ein Frosttag verzeichnet). Diese historische Quellen berichten von Frost und Schnee in ganz Europa. In Südfrankreich werden schwere Frostschäden an Wein- und Obstpflanzen registriert.

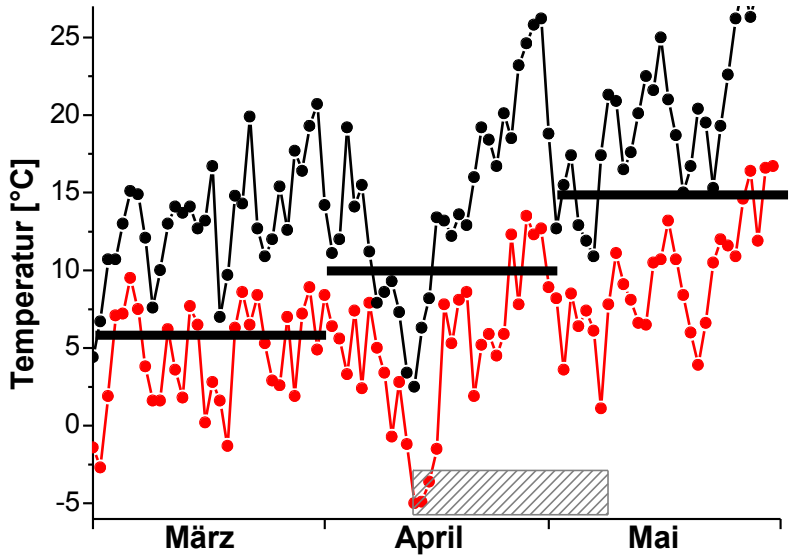


Abb. 3-41: Tagesdaten von Temperatur von März bis Mai im Jahr 1913 an der Klimastation Karlsruhe. Der schraffierte Balken zeigt eine Periode mit stark schwankenden Tagesmaxima und -minima. Nach einer Temperatur von -5°C (13. April) folgte eine Steigerung der Temperatur auf über 25°C und in der Folge eine erneute Abkühlung auf 1°C (8. Mai). - Maxima = schwarz; Minima = rot; horizontale Balken = langjähriges Mittel der Monatstemperatur.

Diese mehrfachen Spätfröste zu Beginn der Vegetationsperiode, die in eine Periode mit ansonsten relativ hohen Frühjahrs-Temperaturen fallen, kommen daher als mögliche Ursache für die sehr häufig auftretenden Merkmale F bzw. Merkmals T in Betracht. Klimatische Parameter (z.B. Niederschlag) und nicht-klimatische Parameter (z.B. Insektenkalamitäten), zeigen keinerlei Auffälligkeiten in diesem Jahr, mit denen diese überregional auftretende holzanatomische Anomalie des Jahres 1913 zu erklären wäre.

Im Jahr 1913 konnte an den Standorten des Mains konnte das Merkmal F bzw. Merkmal T nur an sehr wenigen Eichen im Jahr 1913 beobachtet werden. Der Tages-Temperatur-gang an der Station Würzburg (Main) zeigt einen sehr ähnlichen zur Station Karlsruhe (Rhein), allerdings ohne die charakteristische Temperatur-Abnahme Anfang Mai. Es ist kein Frostereignis vermerkt, und die Tagestemperatur Anfang Mai beträgt minimal +3°C. Das Ausbleiben sehr tiefer Temperaturen (lokal evtl. sogar Frost) Anfang Mai 1913 wird

hier als Grund gesehen, warum Merkmal F/T an Eichen im Maingebiet sehr selten zu finden ist.

Bevor nun einige weitere Jahre als mögliche Ursachen für das Merkmal F bzw. T aufgezeigt werden, soll zunächst näher auf die Holzanatomie der Rezent-Eichen eingegangen und ein Vergleich mit den Versuchseichen gezogen werden (Abb. 3-42).

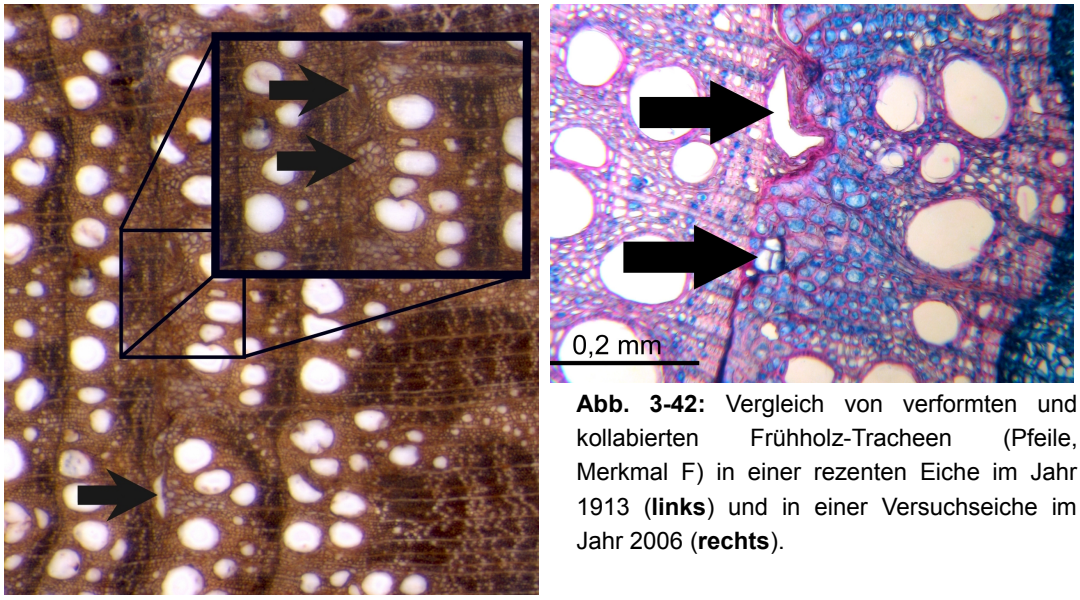


Abb. 3-42: Vergleich von verformten und kollabierten Frühholz-Tracheen (Pfeile, Merkmal F) in einer rezenten Eiche im Jahr 1913 (**links**) und in einer Versuchseiche im Jahr 2006 (**rechts**).

Die Veränderungen in der Holzanatomie sind in den Eichen aus der Rezent-Studie und den Versuchen identisch: Es traten sichelförmig verformte Tracheen in der ersten Reihe des Frühholzes sowie kollabierte (mit Thyllen gefüllte) Gefäße auf (Merkmal F). Eine weitere Gemeinsamkeit ist das gelegentlich auftretende traumatische Gewebe im Frühholz (Merkmal T) in Kombination mit Merkmal F. Merkmal F und Merkmal T ließen sich in den Versuchseichen durch sehr tiefe Temperaturen (Spätfrost) kurz nach Knospenbruch „erzwingen“. Die Auswertung der Merkmale F/T deutet somit auf Spätfröste im Zeitraum April bzw. Mai hin, also auf die Zeitspanne des Knospenbruchs der Eichen.

Nachfolgend sollen weitere Jahre, in denen Merkmal F/T besonders häufig nach Spätfrost-Ereignissen in Erscheinung tritt, aufgezeigt werden. Für das Jahr 1862 (Aus--prägung des Merkmals F bzw. T an drei Reutlinger Standorten, Schwäbische Alb), sind keinerlei Klimadaten in täglicher/monatlicher Auflösung aus der Region vorhanden. Es wurde sich daher historischer Wetterchroniken bedient. In der Wetterchronik (http://www.wetterzentrale.de) von 1862 (aus St. Martin) ist zu lesen:
“Der Winter 1861/62 war sehr gelind. Am 16. Januar auf acht Tage 4-6 Grad Kälte. Dann wieder besser. Februar auch gut, nicht sehr kalt, kein Schnee, etwas Regen; der März meist auch gut und trocken; ab 14. bis 21. Regen mit Nebel an den Bergen besonders am 19., 20., 21. Die Kirschbäume standen Ende März in voller Blüte. April bis auf den 14., 15. und 16. warm und trocken. Augen an den Reben, die Zoll lang gewachsen waren, sind an den letztgenannten drei Tagen erfroren. Auch der Mai war gut....“.
Erneut scheinen tiefe Temperaturen (am 14.-16. April), während des Knospenbruchs der Eichen als Ursache für diese Art von holzanatomischen Veränderungen in Frage zu kommen: Nach einer überaus warmen Phase, deren Beginn in den Monat März fällt, kommt es zu einem erneuten Kälteeinbruch mit Spätfrösten, die direkten Einfluss auf das kambiale Wachstum nehmen und in den Merkmalen F bzw. T mündeten.

Unter Anbetracht der geringen Belegung (zwei Eichen) am Standort Leimersheim (Rhein) im Jahr 1886 macht eine Auswertung nur Sinn unter großer Vorsicht, dennoch soll sie hier nicht unerwähnt bleiben; nicht zuletzt da Klimadaten in täglicher Auflösung vorliegen (Station Karlsruhe). Im Jahr 1886 weisen beide Eichen des Standortes das Merkmal F bzw. T auf. Zwischen dem 28. März und dem 8. April 1886 sind bereits Tagesmaxi-mum-Temperaturen von 22,3°C aufgetreten, nach einer kühleren Phase (10-15°C) stiegen die Temperaturen erneut an: vom 19.-28. April auf 24,5°C, bis sie fünf Tage später auf -2°C fielen und es damit Anfang Mai zu einem Spätfrost-Ereignis kam. Auch in diesem Beispiel scheint ein Spätfrost-Ereignis als mögliche Ursache sehr wahrscheinlich. Enge Parallelen finden sich im Temperaturverlauf des Jahres 1876, indem vier von fünf Eichen eines oberrheinischen Standortes (Rust2) das Merkmal F in äußerst ausgeprägter Art und Weise zeigen. Die verfügbaren Tages-Klimadaten (Station Karlsruhe) weisen in diesem Jahr eine ausgeprägte 14-tägige warme Phase (28. März bis 10. April) mit Tageshöchst-werten zwischen 15 bis 20°C aus. Darauf folgt ein Temperatur-Sturz, der am 14. April in einem Spätfrost-Tag (-1°C) endete. Ein erneuter Anstieg der Temperatur folgte, und erneut kommt es am 15. Mai zu einem Rückgang der Temperatur mit Werten von 0°C.

Durch die sehr gut belegten und regional sehr weiträumigen Standorte ist es sehr wahrscheinlich, dass Spätfröste inmitten von wärmeren Perioden im Frühjahr für die Merkmale F und T ursächlich sind. Dieser Befund wird durch die Verifikation im Eichen-Experiment deutlich bestätigt. Man kann an dieser Stelle auch konstatieren, dass Spätfröste als alleinige Verursacher für diese Merkmale gesehen werden können.

Verschiebt sich eine Wetteranomalie – niedrige Temperaturen gefolgt von hohen Tagesmaxima und ein erneuter Sturz der Temperatur um den Gefrierpunkt – in die Monate Mai und Juni hinein, so zeigt sich auch diese als eine charakteristische Veränderung in der Holzanatomie.

Abbildung 3-43 gibt den Verlauf der Tagesminima und -maxima im Zeitraum April bis Juli im Jahr 1953 an den Klimastationen Karlsruhe (Rhein) und Würzburg (Main) wieder.

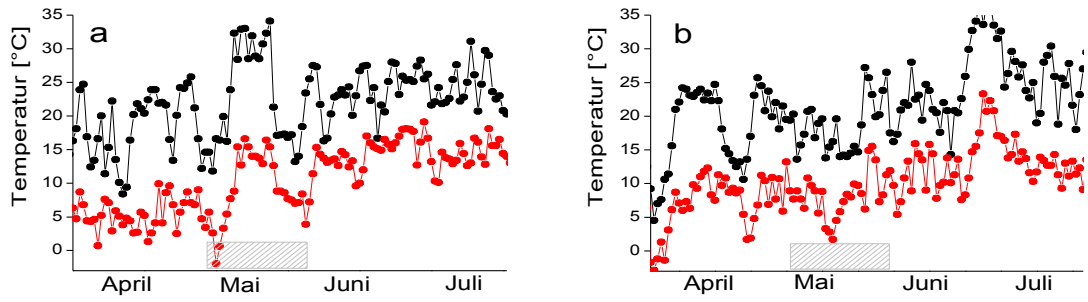


Abb. 3-43: Tagesdaten von Temperatur von April bis Juli im Jahr 1953 an den Klimastationen Karlsruhe **(a)** und Würzburg **(b)**. Die schraffierten Balken zeigen eine Periode (7.5. - 5.6.1953) mit stark schwankenden Tagestemperaturen. Nach niedrigen Temperaturen Anfang Mai (Station Karlsruhe) folgt eine einwöchige Phase mit Tagesmaxima von teilweise über 30°C. Ende Mai bzw. Anfang Juni sinken die Temperaturen erneut auf unter 5°C ab. An der Station Würzburg fällt in der markierten Periode hingegen keine derartige Wetteranomalie auf. - Maxima = schwarz; Minima = rot.

Der Temperaturverlauf an der Station Karlsruhe (Abb. 3-43a) zeigt exemplarisch die eingangs erwähnte Wetteranomalie im Zeitraum von Mai bis Anfang Juni für die Regionen Rhein, Donau und der Schwäbischen Alb – niedrige Temperaturen gefolgt von hohen Tagesmaxima und -minima und ein erneuter Temperatursturz bis nahe zum Gefrierpunkt, die aber an der Klimastation Würzburg nicht beobachtet werden kann (Abb. 3-43b). Während tatsächlich eine sehr große Anzahl von rezenten Eichen aus den Regionen von Rhein, Donau und der Schwäbischen Alb in diesem Jahr (1953) Dichtebänder nach dem Frühholz (Merkmal C) aufweisen, ist Merkmal C in den Eichen der Region Main nicht aufgetreten.

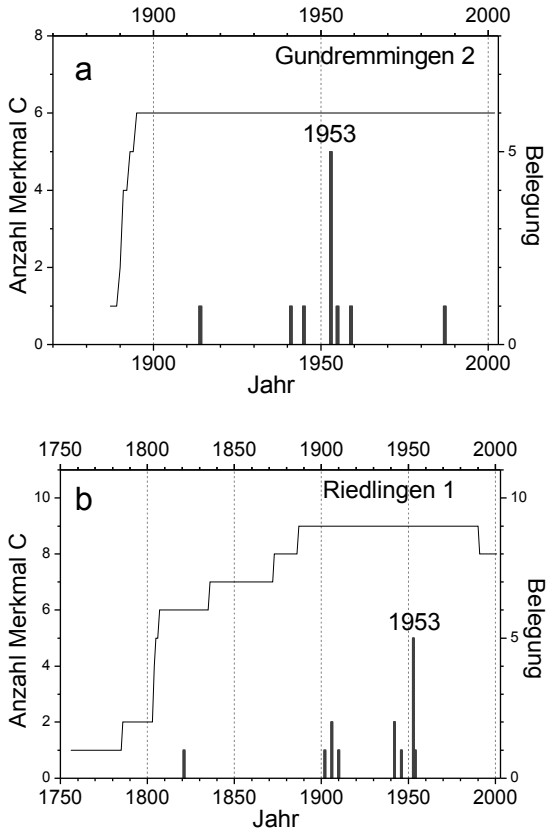


Abb. 3-44: Anomaliegramme der Standorte **a)** Gundremmingen (Donau) und **b)** Riedlingen (Schwäbische Alb). Im Jahr 1953 konnten vermehrt Dichtebänder (Merkmal C) dokumentiert werden. - Balken = Anzahl der Eichen mit Merkmalsausprägung; Linie = Belegung.

Die konsistente Ausprägung und die Häufigkeit des Auftretens dieser Dichtebänder im Jahr 1953 an den Standorten kann – neben Merkmal N im Jahr 1976 – als einzigartig in dieser Untersuchung angesehen werden.

Abbildung 3-44 gibt eine Vorstellung über die hohe Anzahl an Eichen, die im Jahr 1953 Dichtebänder nach dem Frühholz (Merkmal C) ausgebildet hatten. Teils weisen zwischen 30 bis 80 Prozent der untersuchten Bäume deutlich ausgeprägte Dichtebänder nach der Frühholzbildung auf. An weiteren untersuchten Standorten des Rheins, der Donau und der Schwäbischen Alb traten ähnlich hohe Anzahlen auf.

Die extremen Temperaturschwankungen in der Periode von Mai bis Anfang Juni – mit Temperaturdifferenzen zwischen Maxima und Minima von bis zu 40°C und Frösten – scheinen die Ursache für die sehr deutliche Ausprägung der Dichtebänder zu sein. Ob jedoch das Frostereignis Anfang Mai oder das erneute Absinken der Temperatur auf knapp über den Gefrierpunkt der eigentliche Auslöser ist, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden.

Da im Vorfeld der Eichen-Experimente nicht mit einer derart spezifischen Auswirkung von Temperaturschwankungen zu Beginn der Vegetationsperiode gerechnet worden ist, liegen hierzu keine Experimente vor. Man kann dies als Anlass für weitere Experimente nehmen, bezüglich der Auswirkung von Temperaturschwankungen zu Beginn der Vegetationsperiode auf die Holzanatomie.

3.10.3.2 Tiefe (Extrem-)Temperaturen bzw. spontane Temperaturstürze während der Vegetationsperiode (Juni / Juli)

Wie schon im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt, können extreme Schwankungen der Tagesminimum-Temperatur bzw. -maximum-Temperatur als mögliche Ursache für Veränderungen in der Holzanatomie der Eichen gesehen werden.

In den Sommermonaten Juni und Juli 1980 findet sich eine Temperatur-Anomalie, die besonders am Main ausgeprägt ist. In Abbildung 3-45 ist der Temperaturverlauf von Tages-Maxima und -Minima an der Station Würzburg (Main) zu sehen.

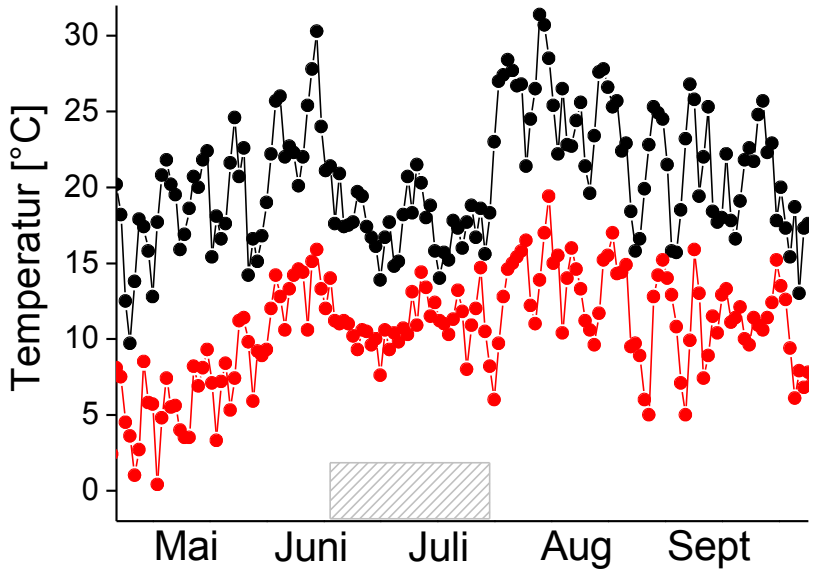


Abb. 3-45: Tagesdaten von Temperatur von Mai bis September im Jahr 1980 an der Klimastation Würzburg. Der schraffierte Balken zeigt eine Periode (22.6. - 23.7.1980) sehr niedriger Maxima- und Minimawerte. - Maxima = schwarz; Minima = rot.

Die Klimastation Würzburg zeigt im Zeitraum vom 22.6.-23.7.1980 (32 Tage) einen Temperatureinbruch, der sich vor allem durch sehr geringe Tagesmaximum-Temperaturen auszeichnet. In dieser Periode steigt die maximale Tagestemperatur kaum über 15°C, die Minima selten über 11°C. Am 23.7.1980 sank die Temperatur sogar bis auf 6°C ab. Die

verfügbaren Temperaturdaten anderer Klimastationen zeigen einen ähnlichen Verlauf, diese fallen jedoch etwas höher aus.

In den Eichen der Main-Standorte treten im Jahr 1980 Kombinationen von holzanatomischen Anomalien auf. Diese sind auch in Eichen anderer Regionen zu finden, dort allerdings nicht als „Anomalie-Weiserjahre“ ausgeprägt. Abbildung 3-46 zeigt das vermehrte Auftreten von Dichtebändern im Jahr 1980 am Standort Faulbach (Main).

Speziell am Standort Faulbach finden sich im Jahr 1980 drei Eichen mit Dichtebänder nach dem Frühholz (Merkmal C) und eine mit einem Dichteband inmitten des Spätholzes (Merkmal D). Allgemein betrachtet sind in diesem Jahr mehrere unterschiedliche Merkmale ausgebildet: Neben den erwähnten Merkmalen C und D auch Merkmal N (fehlendes Spätholz), wenn auch seltener.

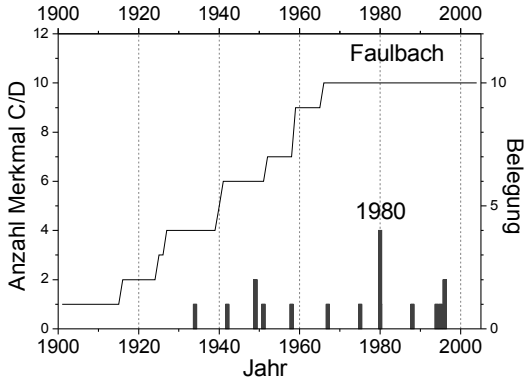


Abb. 3-46: Anomaliegramm des Standortes Faulbach (Main). Im Jahr 1980 ließen sich in Eichen vermehrt Dichtebänder sowohl am Ende des Frühholzes (Merkmal C) als auch inmitten des Spätholzes (Merkmal D) dokumentieren. - Balken = Anzahl der Eichen mit Merkmalsausprägung; Linie = Belegung.

Wie schon für Schwankungen der Temperaturen zu Beginn der Vegetationsperiode gezeigt, lässt sich auch bei anomalen Temperaturstürzen innerhalb der Wachstumsperiode (hier Juni und Juli) eine Reaktion finden. Für Ausbilden von Dichtebändern (Merkmal C, D) bzw. für vorzeitiges Abschließen radialen Wachstums (Merkmal N) scheinen weniger die sinkenden Tagesmaxima der Temperatur verantwortlich zu sein als vielmehr die tiefen Minima (unter 10 °C) über mehrere Wochen hinweg. Kühlere Sommer-Perioden finden sich relativ häufig in den Klimadaten, ein Absinken der Minimum-Temperaturen auf ein solch niedriges Niveau ist allerdings sehr selten. Lokal betrachtet könnte dieser Temperatursturz sogar ein Frostereignis zur Folge gehabt haben (hierzu liegen aber keine verlässlichen Daten vor). Das Auftreten von Merkmalskombinationen (Merkmal C, D, N) ist zuvor in dieser Deutlichkeit nicht aufgetreten.

3.10.4 Überflutung und mögliche Folgen für die Holzanatomie rezenter Eichen

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit Dr. V. Späth vom Institut für Landschaftsökologie und Naturschutz (ILN) in Bühl sowie mit verschiedenen Forstämtern lies es zu, dass für diese Arbeit Eichen an Naturstandorten beprobt werden konnten, die nachweislich einem Jahrhundert-Hochwasser ausgesetzt waren. Die Auswirkungen konnten an vier Standorten im Oberrheintal untersucht werden, die unterschiedliche Bestandesalter aufweisen und unterschiedlichen Hochwasserdynamiken ausgesetzt waren.

Am 12. Mai 1999 kam es durch ergiebigen Starkregen in Süddeutschland und Schneeschmelze in den Alpen zu einem sprunghaften Anstieg des Wasserpegels am Oberrhein und in dessen Folge zu einem sogenannten „Jahrhundert-Hochwasser“. Ursache hierfür war das Zusammentreffen subtropischer Warm- und polarer Kaltluft über dem Atlantik, das schließlich zu einer stationären Frontalzone über den Alpen führte. Diese Situation bietet jetzt Gelegenheit, die Auswirkungen eines extremen (Früh-)Sommerhochwassers auf holzanatomischer Ebene zu untersuchen. Im Mai bis Ende Juni blieben die Wasserstände am Oberrhein konstant hoch, so dass auch höher gelegene Hartholzauen bis zu 40 Tage überschwemmt blieben. Abbildung 3-47 zeigt einen Vergleich holzanatomischer Strukturen zwischen einer rezenten Eiche am Standort Leimersheim im Jahr 1999 und einer Versuchseiche, an der Sommer-Hochwasser simuliert worden war.

In dem 1999 ausgebildeten Jahrring der Eiche aus Leimersheim sind deutlich die traumatisch vergrößerten Spätholz-Tracheen zu erkennen, die wie ein zusätzlicher Jahrring wirken (Merkmal G). Die Querschnittsflächen dieser Spätholz-Tracheen liegen zwischen denen des Frühholzes und denen

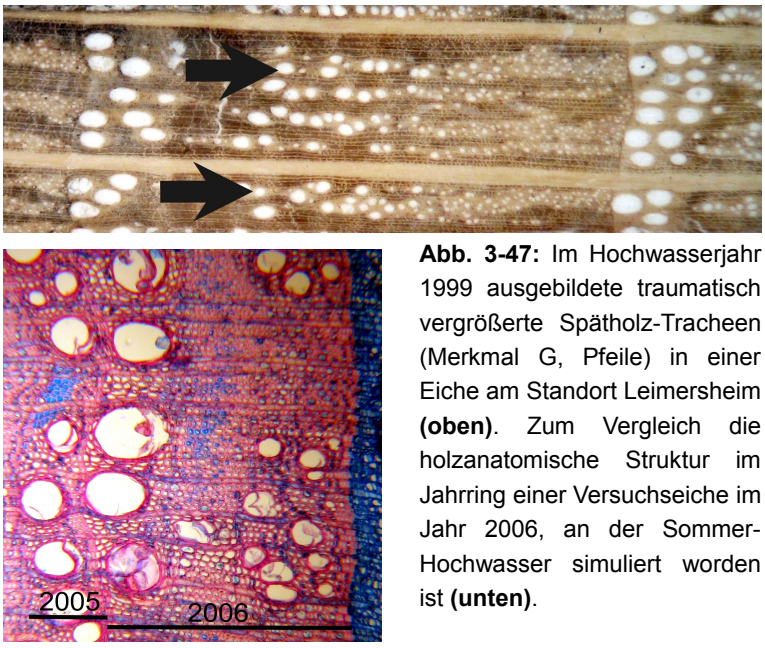


Abb. 3-47: Im Hochwasserjahr 1999 ausgebildete traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G, Pfeile) in einer Eiche am Standort Leimersheim **(oben)**. Zum Vergleich die holzanatomische Struktur im Jahrring einer Versuchseiche im Jahr 2006, an der Sommer-Hochwasser simuliert worden ist **(unten)**.

des folgenden Spätholzes. Die holzanatomischen Strukturen der Vorjahre und der Jahre danach weisen keine derartigen Veränderungen auf. Im direkten Vergleich zu einer Versuchseiche, an der Sommer-Hochwasser im Jahr 2006 simuliert worden ist, wird die vollkommen übereinstimmende zelluläre Veränderung vergrößerter Spätholz-Tracheen deutlich sichtbar.

In 17 von 26 Eichen, die nachweislich durch das Hochwasser im Jahr 1999 betroffen waren, finden sich derartige vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G). Abbildung 3-48 zeigt das Anomaliegramm für Merkmal G an den untersuchten Eichen der Standorte Au 1, Au 2 und Leimersheim.

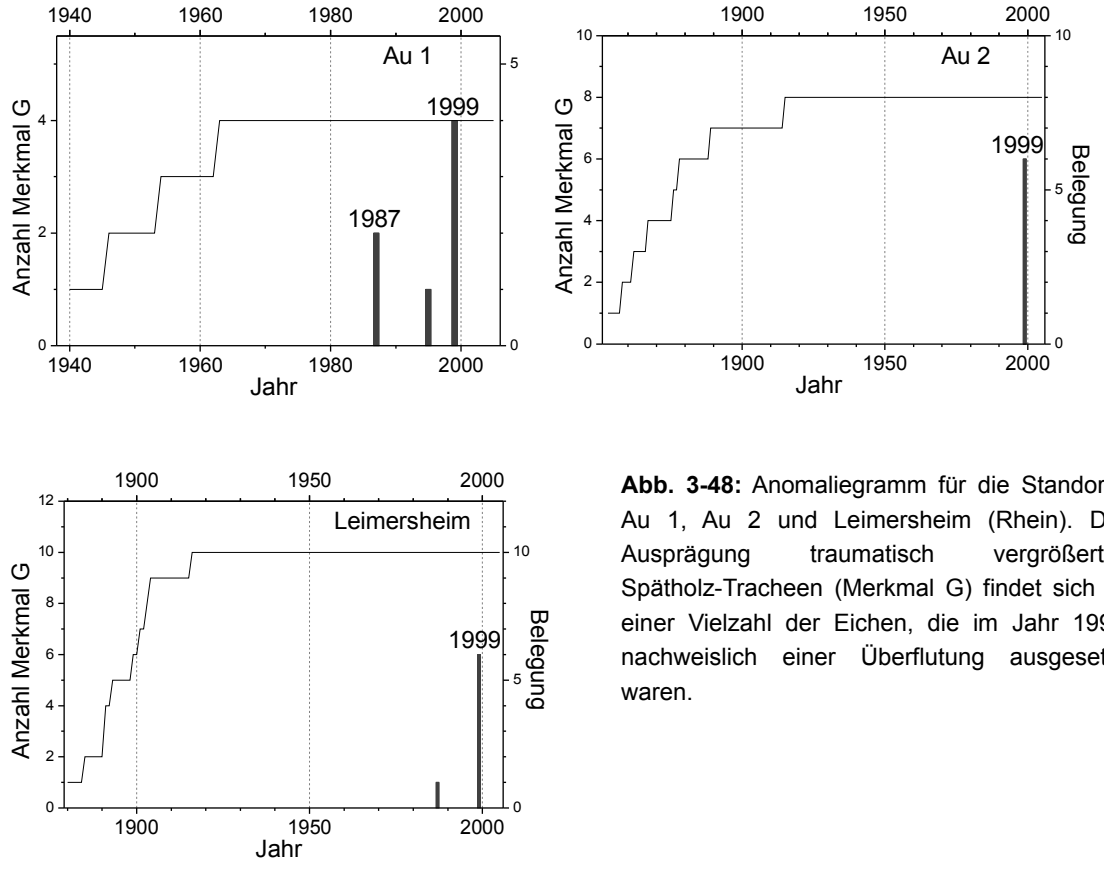


Abb. 3-48: Anomaliegramm für die Standorte Au 1, Au 2 und Leimersheim (Rhein). Die Ausprägung traumatisch vergrößerter Spätholz-Tracheen (Merkmal G) findet sich in einer Vielzahl der Eichen, die im Jahr 1999 nachweislich einer Überflutung ausgesetzt waren.

Aus dem Anomaliegramm ist die konsistente Ausprägung des Merkmals G in den Eichen zu entnehmen. Am Standort Au 1 weisen alle untersuchten Eichen derartige traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen auf; in den Eichen der anderen Standorte lassen 75% (Au 2) und 60% (Leimersheim) diese holzanatomische Anomalie erkennen.

Zur Klärung der Frage, ab welcher Überflutungsdauer (Standzeit des Wasser am Stamm) sich die Spätholz-Tracheen traumatisch vergrößern, ist eine Eiche des Standortes Au2, an der die exakten Standzeiten des Wassers am Stamm bekannt sind, in verschiedenen Stammhöhen beprobt worden (Abb. 3-49).

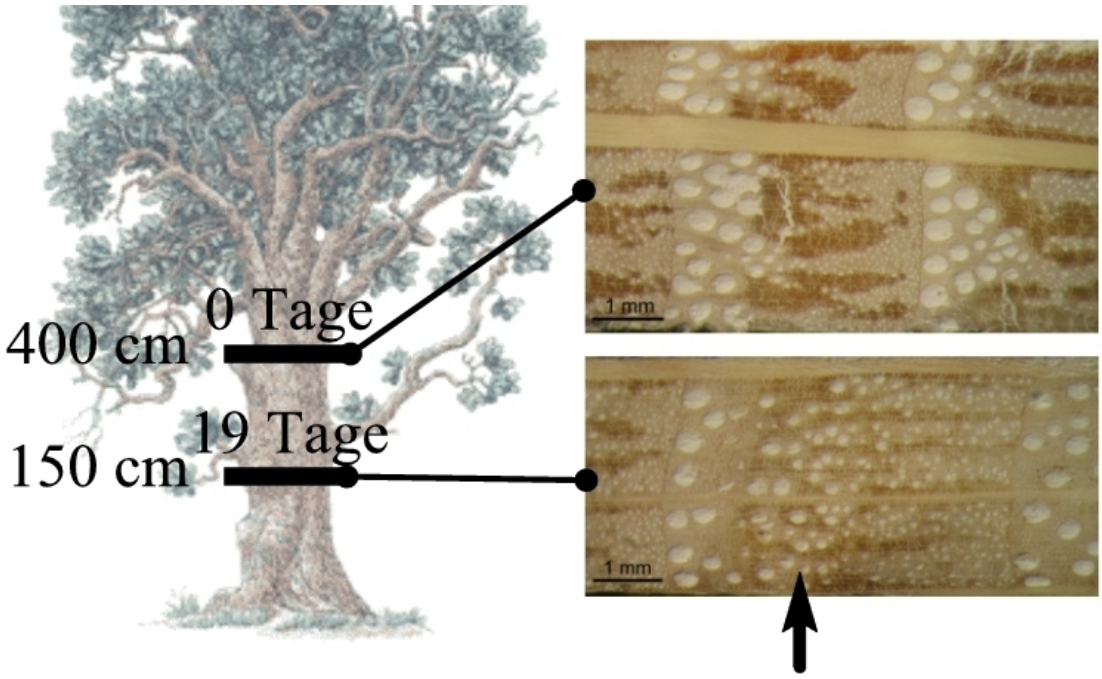


Abb. 3-49: Im Jahr 1999 mit einem „Jahrhundert-Hochwasser“ ausgebildete traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G, Pfeil) in einer Eiche am Standort Au 2 (Rhein) in 150 und 400 cm Stammhöhe und zugehöriger Überflutungsdauer.

Die untersuchte Eiche ist ab der Stammbasis ausgehend in 50 cm Schritten beprobt worden. Während bis in eine Stammhöhe von 150 cm traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen mit deutlicher Ausprägung festzustellen sind, fiel die Ausprägung dieser holzanatomischen Anomalie ab 200 cm Stammhöhe völlig aus. Bis in 400 cm – was die

maximale Probenhöhe darstellt – weist die untersuchte Eiche in ihrer Holzanatomie keinerlei Anomalien mehr auf. Durch die Verifikation im Eichen-Experiment kann ebenfalls festgestellt werden, dass die Ausprägung traumatisch vergrößerter Spätholz-Tracheen nur in dem Stammbereich auftritt, der sich unterhalb des Wasserspiegels und in der Nähe zur Stammbasis befindet. In gängiger Beprobungshöhe (Brusthöhe) schwankte die Dauer der Überflutung je nach Standort Meereshöhe der Eichen teils erheblich. Am Standort Au 1 beträgt diese ca. 21 Tage, an den Standorten Au 2 und Au 3 rund 17 Tage. Die Eichen am Standort Leimersheim sind aufgrund der außerordentlichen Situation 30 Tage Überflutung in Brusthöhe ausgesetzt gewesen.

Wie schon im Kapitel 3.6.4 beschrieben findet sich die Ausprägung des Merkmal G nicht homogen entlang der Stammhöhe. Dies wird weiterhin durch Stammscheiben von Eichen aus unmittelbarer Nähe des Standortes Au (Veldesgrund) aus Höhen von 30 bis 80 Zentimeter bestätigt, die Überflutungsdauer in 50 cm Stammhöhe betrug dort bereits 36 Tage.

Offensichtlich reicht eine stetige Überflutung von drei Wochen aus, damit sich die Spätholz-Tracheen traumatisch vergrößern und es zur Ausprägung des Merkmals G kommt. Die Untersuchungen zeigen ferner, dass das Merkmal G wesentlich häufiger in adulten als in juvenilen Eichen zu finden ist.

Eine Kombination mit einem weiteren Merkmal – wie sie beispielsweise bei den Merkmalen F bzw. T der Fall ist – kann hier nicht festgestellt werden. Bei dieser handelt es sich anscheinend um eine sehr spezifische holzanatomische Anomalie, die durch sehr langanhaltende Hochwasser-Standzeiten während der Vegetationsperiode vor allem in geringen Stammhöhen ausgelöst wird.

Das Jahrhundert-Hochwasser 1999 traf nicht nur Eichen relativ naturnaher Hartholzauen (Standorte Au 1, 2 und 3), sondern auch Eichen eines Bestandes bei Leimersheim, die infolge von Schäden am Hochwasser-Damm durch eine bis dato einmalige Situation überflutet worden waren.
Dr. V. Späth führte im Auftrag der Forstdirektion Karlsruhe Untersuchungen zur Hochwasserdynamik und zur standortskundlichen Einstufung im Forstbezirk Rastatt durch (Späth, 1999; Späth, 2002). Das Hochwasser 1999 kann durch seine Überflutungsdauer und -höhe wohl als das Hochwasser-Ereignis am Rhein im 20. Jahrhundert bezeichnet werden, insbesondere auf dem Niveau hochgelegener, seltener überfluteter Hartholzauen. Im Jahr 1987 kam es ebenfalls zu einem extremen Sommerhochwasser-Ereignis, das mit dem 1999-Event vergleichbar ist. Das 1999iger Hochwasser übertrifft allerdings das von 1987 in Höhe und Länge der Überflutung. Zudem war das 1987iger Hochwasser weiter in die Vegetationsperiode hinein verschoben (Juni-Juli). Wie aus Abbildung 3-48 ersichtlich

ist, ist Merkmal G auch im Jahr 1987 in den Eichen des Standorts Au 1 zu finden. Diese Eichen sind die am tiefsten stehenden im Gebiet (Veldesgrund) mit unmittelbarem Kontakt zu einem Altarm.

Tabelle 3-6 fasst die Ausprägung des Merkmals G in den Jahren 1987 und 1999 zusammen. Offensichtlich ist Merkmal G sehr gut geeignet, Überflutungen aus der Holzanatomie zu datieren.

Tab. 3-6: Ausprägung des Merkmals G der Jahre 1987 und 1999 in Prozent an den Standorten Au 1, 2, 3 und Leimersheim (Leim). - X=keine Eichen vorhanden.

Standort	1987	1999
Au 1	50	100
Au 2	0	75
Au 3	X	25
Leim	10	60

Die Klärung möglicher Ursachen, die für die Ausprägung von schmalen Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV) in Frage kommen, sind aufgrund des seltenen Auftretens erschwert. „Anomalie-Weiserjahre“ können nicht herangezogen werden; dies zeigt wie wichtig die Verifikation im Experiment ist. Im Experiment zeigen diejenigen Eichen das Merkmal SEV, die zum Zeitpunkt des Knospenbruchs einer Überflutung ausgesetzt waren. Das Fehlen des Merkmals SEV ist wohl nicht der Tatsache geschuldet, dass Eichen diese Art von Anomalie nicht ausprägen können, sondern eher der Tatsache, dass während der vergangenen 120 Jahre an keinem der Flüsse Rhein, Main oder Donau zum Zeitpunkt des Knospenbruchs ein extrem ausgeprägtes Hochwasser auftrat. Jedoch zeigen Forschungsergebnisse von Belien (2008), die in einem regelmäßig im Frühjahr überfluteten Wald nahe dem Fluss Ijssel (Deventer, NL) gewonnen wurden die anomale Ausprägung sehr schmaler Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV).

Der Spätholzbreiten-Zuwachs adulter Eichen ist im Jahr 1999 auf den Standorten Au 1, Au 2 und Leimersheim mit zwei bis vier Millimeter beträchtlich höher als in den Jahren vor und nach dem Ereignis. Derjenige von juvenilen Eichen (Standortes Au 3) jedoch ist mit vier Millimeter zwar sehr hoch (Juveniltrend), liegt aber nicht höher als in den Jahren vor und nach dem Hochwasser. Adulte Eichen zeigen damit eine sehr positive Reaktion auf die Überflutung.

Die Jahrringbreiten-Messungen der bereits oben erwähnten Eiche des Standortes Au 2, die an 9 Punkten zwischen 25 und 400 cm Stammhöhe beprobt wurde, werden nachfolgend mit den Messungen aus dem Eichen-Experiment verglichen (Abb. 3-50).

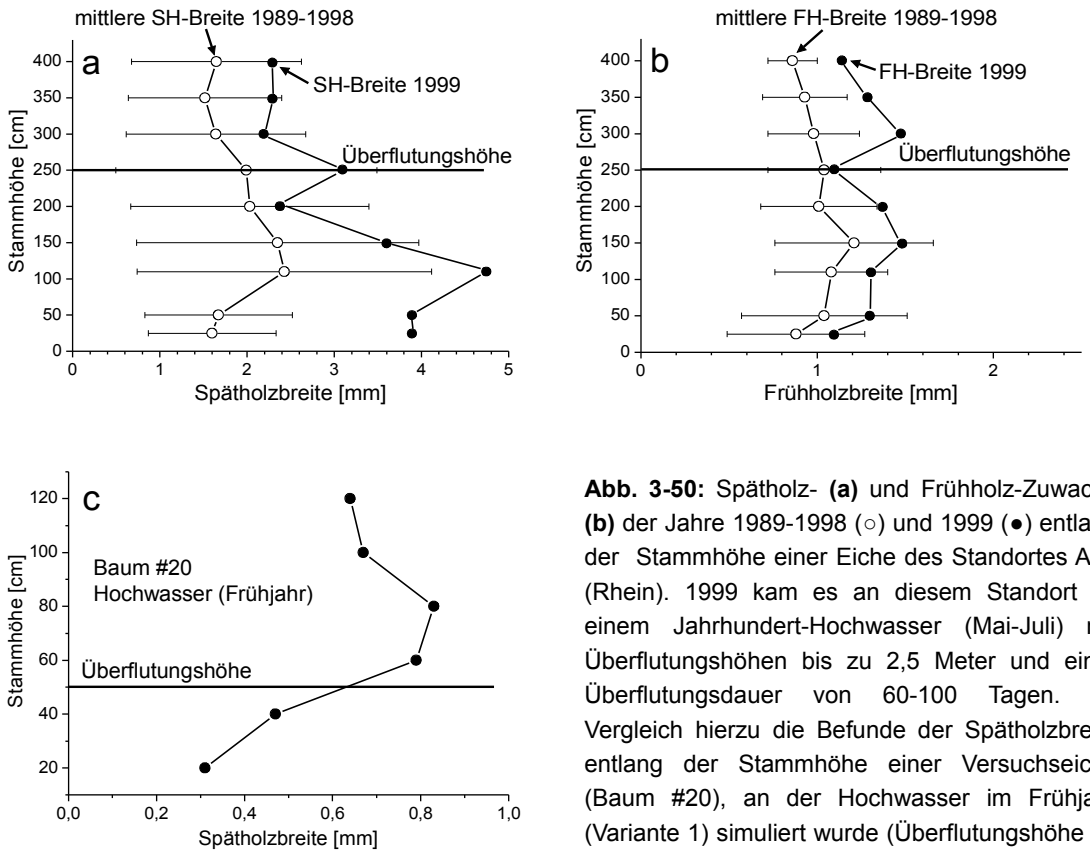


Abb. 3-50: Spätholz- **(a)** und Frühholz-Zuwachs **(b)** der Jahre 1989-1998 (○) und 1999 (●) entlang der Stammhöhe einer Eiche des Standortes Au2 (Rhein). 1999 kam es an diesem Standort zu einem Jahrhundert-Hochwasser (Mai-Juli) mit Überflutungshöhen bis zu 2,5 Meter und einer Überflutungsdauer von 60-100 Tagen. Im Vergleich hierzu die Befunde der Spätholzbreite entlang der Stammhöhe einer Versuchseiche (Baum #20), an der Hochwasser im Frühjahr (Variante 1) simuliert wurde (Überflutungshöhe 50 cm). - SH = Spätholz; FH = Frühholz.

Die Spätholzzuwächse der adulten Eiche aus Au (Rhein) fallen im Ereignisjahr 1999 generell breiter aus als im Vergleichszeitraum 1989 bis 1998 (Abb. 3-50a), jedoch im unteren Stammabschnitt teils mehr als doppelt so hoch. Vergleicht man dies mit dem Spätholzbreiten-Zuwachs einer Versuchseiche (Abb. 3-50c), so wird deutlich, dass er ähnlich verläuft: direkt an der Stammbasis treten geringere Zuwächse auf, die anschließend mit der Höhe bis zur Überflutungsgrenze ansteigen und in der Luft wieder absinken. Der Zuwachs des Frühholzes (Abb. 3-50b) verläuft ähnlich wie im Vergleichszeitraum 1989 bis 1998. Lediglich im oberen Stammabschnitt ist dieser leicht erhöht. Wird der Gesamtringzuwachs entlang der Stammhöhe betrachtet, so fällt der Unterschied zu den Jahren ohne Sommer-Hochwasserereignis noch deutlicher aus.

Hingegen zeigen rezente Eichen, die extremen Winter-Hochwassern ausgesetzt sind, keine signifikanten radialen Zuwachsänderungen auf; sowohl bezüglich Früh- als auch

Spätholzbreite. Dies konnte für Winter-Hochwasser (beispielsweise vom November 1882, Februar 1909 und Januar 2003) am Main festgestellt werden (hier nicht gezeigt). Sogar extreme Winter-Hochwasser – die am Main als die katastrophalsten in den letzten 120 Jahren gelten – manifestieren sich demnach weder in der Holzanatomie noch im radialen Zuwachs.

3.11 Weiserjahr-Analyse holzanatomischer Anomalien von Früh- und Spätholzbreiten rezenter Eichen auf lokaler, regionaler und überregionaler Ebene

Mit Hilfe der Weiserjahre lassen sich bestimmte klimatische Ereignisse mit hoher Wahrscheinlichkeit zeitlich zuordnen.

3.11.1 Analyse regional und überregional auftretender holzanatomischer Anomalien zur Erfassung von „Anomalie-Weiserjahre

„Anomalie-Weiserjahre“ sind hier als Jahre zu verstehen, in denen holzanatomische Veränderungen der gleichen oder ungleichen Art an mindestens 50 % der Eichen eines Standortes ausgeprägt sind. Ihr Auftreten wird an sechs Beispielen unterschiedlicher Merkmalsausprägungen näher beleuchtet. Im „Anomaliegramm“ der Abbildung 3-51 sind exemplarisch vier überregionale „Anomalie-Weiserjahre“ 1913 (Merkmal F, T, A+), 1941/42 (Merkmal C, N, N+), 1953 (Merkmal C, D, N) sowie zwei regionale 1976 (Merkmal N, N+) und 1999 (Merkmal G) besonders gekennzeichnet:

„Anomalie-Weiserjahre“ treten innerhalb des vergangenen Jahrhunderts mehrfach sowohl regional als auch überregional in Erscheinung.

Kollabierte und deformierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F), gehäuft in Kombination mit traumatischem Gewebe (Merkmal T), treten an 28 Prozent der Standorte im Jahr 1913 als „Anomalie-Weiserjahre“ auf (sie deuten auf Spätfrost hin). Hinzu kommt, wenn auch sehr selten, ein verbreitertes Frühholz (Merkmal A+). An Standorten des Oberrheins (Leimersheim, Rust), der Schwäbischen Alb (Reutlingen 1, 3) und der Donau (Gundremmingen 2) finden sich Bestände mit dieser Merkmalskombination. In Eichen an

den Main-Standorten treten diese Merkmale zwar auf, jedoch nicht in der Häufigkeit, als dass ein „Anomalie-Weiserjahr“ hätte definiert werden können.

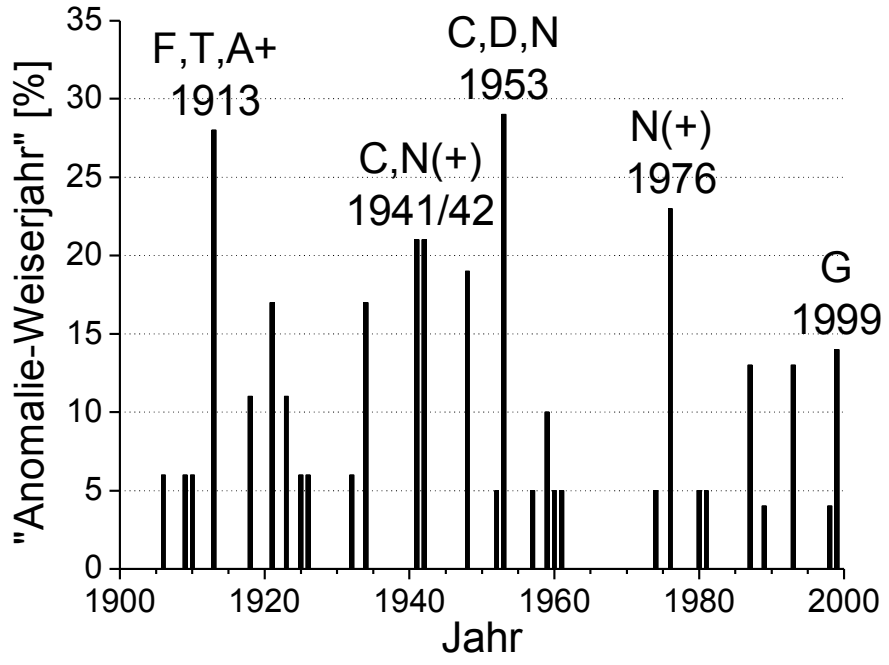


Abb. 3-51: Prozentuale Ausprägung besonders markanter „Anomalie-Weiserjahre“. Im Jahr 1913 weisen 28 % aller Standorte ein „Anomalie-Weiserjahr“ (Merkmale F, T, A+) auf, in den Jahren 1941/42 jeweils 21 % (Merkmale C, N, N+), im Jahr 1953 29 % (Merkmale C, D, N), im Jahr 1976 23 % (Merkmale N, N+) und im Jahr 1999 14 % (Merkmal G).

Die Untersuchungen an rezenten Eichen, und auch im Rahmen des Eichen-Experiments, zeigen eindeutige Ergebnisse hinsichtlich der Ursache: Spätfröste führen zur Ausbildung von traumatisiertem Gewebe. Merkmal F und Merkmal T finden sich im Jahr 1913 in Eichen aus verschiedenen Regionen und damit als überregionales Signal, wie für Temperaturen zu erwarten.

In den Jahren 1941/42 ist an jedem fünften (21 %) Eichen-Standort ein „Anomalie-Weiserjahr“ ausgeprägt. Besonders häufig findet sich eine starke Reduktion bzw. ein völliger Ausfall des Spätholzes (Merkmal N und N+); aber auch Dichtebänder zu Beginn (Merkmal

C) und inmitten des Spätholzes (Merkmal D) sind verbreitet. Insbesondere Eichen aus den Regionen an Rhein, Main, Donau und der Schwäbischen Alb zeigen diese holzanatomischen Veränderungen; obwohl die Ausprägung dieser Merkmale überregional auftritt, bleibt sie innerhalb der Regionen auf einzelne Standorte beschränkt. Zur Ursache kann – nach intensiver Begutachtung aller vorhandenen biotischen und abiotischen Daten – keine eindeutige Aussage getroffen werden. In Verdacht stehen hier sowohl saisonale Trockenperioden als auch kurze Temperaturstürze im Frühjahr, die wegen fehlenden Tagesdaten, aber nicht genau ermittelt werden können. Die Ursache bleibt diesbezüglich spekulativ. Eine Kombination von mehreren Klimafaktoren ist ebenso vorstellbar.

1953 stellt das Jahr mit der höchsten Anzahl einer holzanatomischen Veränderung in der vorliegenden Untersuchung dar. An fast einem Drittel der Standorte treten Dichtebänder zu Beginn des Spätholzes (Merkmal C) und/oder fehlendes Spätholz (Merkmal N) auf. Mehr noch: fast ausnahmslos lassen sich diese Merkmale in wenigstens einer Eiche an je Standort finden. Da die zeitliche Mannigfaltigkeit von abrupten Temperaturstürzen zu Beginn der Vegetationsperiode nicht im Eichen-Experiment berücksichtigt worden ist, kann hier ausschließlich die Auswertung im Rahmen der Rezent-Studie stattfinden. Da die Merkmalsausprägung überregional auftritt kann davon ausgegangen werden, dass die Ursache in Spätfrösten – oder wenigstens relativ tiefe Tagesminimum-Temperaturen knapp oberhalb des Gefrierpunkts zum Beginn der Vegetationsperiode – zu suchen ist; die Auswertung hochaufgelöster Klimadaten (Tagesdaten) zeigt dies deutlich.

Das ausgeprägte Fehlen des Spätholzes (Merkmal N, N+) im Jahr 1976 – an manchen Eichen sogar über mehrere Jahre – tritt an jedem vierten untersuchten Standort als „Anomalie-Weiserjahr“ in Erscheinung; verteilt über die Regionen des Mains, des Rheins, der Donau und der Schwäbischen Alb lässt sich diese holzanatomische Anomalie finden. Besonders häufig tritt dieses Merkmal in den Eichen an Main und Rhein auf. Eine Periode von sechs Jahren, die sich durch äußerst geringe Niederschläge auszeichnet, wird hierfür als Auslöser betrachtet. Diese eher untypische überregionale Ausbreitung vereinfacht die Beweisführung zur Ermittlung der zugrunde liegenden Ursache. Die Ergebnisse aus dem Experiment sind jedoch nicht konform mit der Rezent-Studie.

Traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G) stellen eine Anomalie dar, die einen standortsgebundenen (Eichen der Hartholzaue) und regionalen (Rhein) Charakter hat. Die Auswirkung von langanhaltender Überflutung im Sommer konnte an sehr vielen

Eichen in den Hartholzauen des Rheins gefunden werden, deren Überflutungshöhe und -dauer sehr gut bekannt sind. Unbedingt erwähnt werden sollte an dieser Stelle, dass die Ausprägung der vergrößerten Spätholz-Tracheen zwar ausschließlich an Standorten des Rheins ausgeprägt ist, aber es unwahrscheinlich erscheint, dass diese Veränderung in der Holzanatomie prinzipiell nicht auch bei Eichen anderer Regionen auftreten könnte. Das Abflussverhalten des Rheins – mit seinen typischen Abflussspitzen im (Früh-)Sommer – sind wohl eher Grund hierfür; die Abflussspitzen des Mains beispielsweise liegen in den Monaten Februar / März. Die Ergebnisse des Eichen-Experiments zeigen völlige Übereinstimmung hinsichtlich der Veränderung in der Holz-anatomie, die durch Hochwasser bzw. Überflutung im Sommer entsteht.

Abschließend seien die Jahre 1921 (17%), 1934 (17%) und 1948 (19%) genannt, die sich ebenso als „Anomalie-Weiserjahre“ durch das Merkmal N (fehlendes Spätholz) auszeichnen. Neben mehreren Standorten am Main prägen auch Eichen an Standorten der Schwäbischen Alb sowie ein Standort am Rhein dieses Merkmal besonders häufig aus. Saisonale Trockenperioden, die zumeist schon in den Wintermonaten ihren Anfang finden und sich bis in die Monate August oder September des Folgejahrs ziehen, werden als Auslöser für die Veränderung in der Holzanatomie gesehen. Für das Jahr 1921 konnte dies mittels den sehr gut aufgelösten Tagesdaten nachvollzogen werden. Eine Dimension, wie die mehrjährige Trockenperiode von 1971 bis 1976 erreichen diese Jahre aber nicht; die Häufigkeit der holzanatomischen Ausprägung ist daher etwas geringer.

3.11.2 Analyse von Chronologien aus rezenten Eichenpopulationen auf Früh- und Spätholzbreiten-Weiserjahre

Für den Zeitraum ab dem Jahr 1900 wurde eine Chronologie-Analyse auf Weiserjahre, separiert für Früh- und Spätholzbreiten, durchgeführt und mit zeitlich hochaufgelösten Klima-, Fraß-, und Eichelmast-Daten verglichen. Da die Datenverfügbarkeit für die Regionen des Rheins und Mains besonders gut ist und über die Hälfte der untersuchten Standorte in diesen Regionen liegt, soll im Folgenden ein weiserjahr-analytischer Vergleich zwischen diesen beiden Regionen vorgestellt werden. In Abbildung 3-52 ist das Ergebnis zu sehen.

Es fällt auf, dass sowohl am Rhein als auch am Main mehr „negative“ (starke Abnahme des radialen Zuwachses) Spätholz-Weiserjahre ausgeprägt sind als „positive“ (starke Zunahme des radialen Zuwachses). In den Jahren 1921, 1925 und 1929 zeigen über dreiviertel der Rhein- und Main-Standorte gemeinsame negative Spätholz-Weiserjahre. Am Rhein kommen die Jahre 1905 bzw. 1954 und am Main die Jahre 1934, 1976, 1991 und 1998 hinzu. In den Jahren 1921, 1934 und 1976 zeigen alle untersuchten Standorte am Main ein negatives Spätholz-Weiserjahr. Diese vollständige Übereinstimmung tritt am Rhein nur im Jahr 1921 auf.

Übereinstimmungen zwischen positiven Spätholz-Weiserjahren an Rhein und Main können nicht gefunden werden. Für den Rhein sind die positiven Spätholz-Weiserjahre 1914, 1927, 1961 und 1969 und für den Main die Jahre 1932 und 1999 zu nennen.

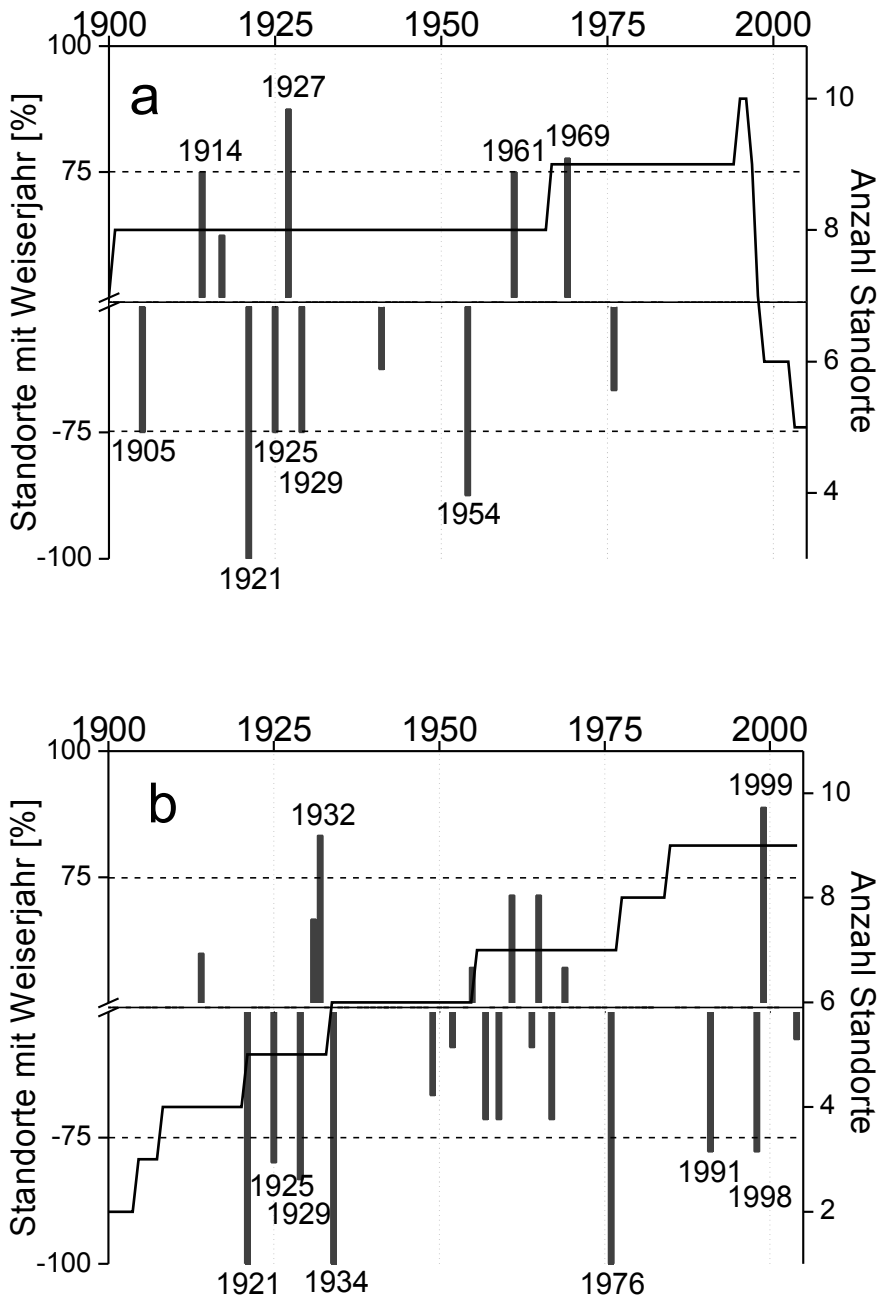


Abb. 3-52: Analyse der Spätholzbreiten-Chronologien von 1900-2004 für **a)** die Region Rhein und **b)** Main. Aufgetragen sind die Jahre, in denen es an Rhein bzw. Main zu positiven (starke Zunahme des radialen Zuwachses) bzw. negativen (starke Abnahme des radialen Zuwachses) Weiserjahren kommt. - Gestrichelte Linie = 75% der Standorte zeigen ein Weiserjahr.

3.11.2.1 Zuordnung von Spätholz- bzw. Frühholz-Weiserjahren zu abiotischen und biotischen Extrem-Ereignissen in der Region Main

Analysiert man die Jahre, in denen eine hohe Ausprägung von Weiserjahren an den Main-Standorten zu finden ist, auf biotische und abiotische Extrem-Ereignisse hin, so findet sich folgendes:
Die negativen Spätholz-Weiserjahre 1921, 1934, 1976, 1991 und 1998 fallen auf klimatische „Extremjahre“, die sich durch stark negative Niederschlagsanomalien und niedrige Pegelstände während der Vegetationsperiode auszeichnen. Jahre in denen es in Einzelmonaten zu einer starken Abnahme des Niederschlages oder des Pegelstandes kommt, zeigen nur sehr begrenzt eine Reaktion. Das Jahr 1928 soll als Beispiel dienen: Im Juli fielen 22 Prozent der üblichen Niederschlagsmenge; Mai, Juni und August liegen dagegen in der Norm. Ausschlaggebend für ein Spätholz-Weiserjahr scheint eher eine monatelange (mehr als acht Wochen) Abnahme des Niederschlages, des Pegelstandes bzw. des Grundwasserspiegels zu sein, als vier bis sechs Wochen extreme negative Abweichungen von der Norm.

Die negativen Spätholz-Weiserjahre 1925 und 1929 der Main-Standorte sind aus klimatologischer Sicht nicht erklärbar. Es finden sich in den Klimadaten keinerlei extreme Abweichungen von der Norm.

Tendenziell kann für positive Spätholz-Weiserjahre festgestellt werden: Sommer bzw. Vegetationsperioden mit mindestens 8-wöchiger stark positiver Abweichung (=Erhöhung) der Niederschlagssumme bzw. des Pegelstandes begünstigen die Ausbildung. Das Jahr 1965 soll als Beispiel dienen: Im Juni und Juli fielen 122 % der Niederschlagsnorm. In dreiviertel der Standorts-Chronologien finden sich positive Spätholz-Weiserjahre.

Die positiven Spätholz-Weiserjahre 1932 und 1999 können ebenfalls klimatisch nicht erklärt werden. 84 bzw. 89 Prozent der Main-Standorte weisen in diesen Jahren eine starke positive Abweichung im Spätholzbreiten-Wachstum auf.

Auf Jahre mit extrem kalten (z.B. 1956, abs. Abw.: -10,0°C) oder warmen (z.B. 1966, abs. Abw.: +5,3°C) Wintermonaten mit vielen Eistagen (Februar 1956; abs. Abw.: +22 Eistage), sowie weit überdurchschnittlich heiße Sommer (z.B. 2003, abs. Abw.: +3,4°C), reagieren die Eichen weder mit einem stark gesteigerten noch mit einer überdurchschnittlichen Reduktion im Spätholzbreiten-Zuwachs.

Während die Spätholz-Weiserjahre klare Ergebnisse zeigen, ist dies für die Frühholz-Weiserjahre (siehe Anhang) nicht der Fall: Obwohl auch hierfür Jahre mit hoher Ausprägung vorliegen (1912, 1941, 2004) finden sich keine klaren Ergebnisse.

3.11.2.2 Zuordnung von Spätholz- bzw. Frühholz-Weiserjahren zu abiotischen und biotischen Extrem-Ereignissen in der Region Rhein

Das negative Spätholz-Weiserjahr 1921 kann, wie zuvor an den Main-Standorten, mit einem charakteristischen Niederschlagsdefizit in den Monaten Juni und Juli (rel. Abw.: -71 %), bzw. mit beträchtlich gesunkenem Wasserstand von April bis August (rel. Abw.: -27 %), in Bezug gesetzt werden.

Wie schon für den Main, lässt sich auch für den Rhein im Jahr 1925 bzw. 1929 kein extremes klimatisches Ereignis aufzeigen, das die negativen Spätholz-Weiserjahre erklären könnte. Da es sich um deutliche, überregionale Ereignisse an Rhein und Main zu handeln scheint, ist es um so verwunderlicher, dass sich kein klares Ereignis fassen lässt. Weder die täglich aufgelösten Daten von Temperatur und Niederschlag, noch die verfügbaren Daten über Kalamitäten oder Eichelmasten zeigen hierzu einen Zusammenhang.

Alle positiven Spätholz-Weiserjahre der Rhein-Standorte (1914, 1927, 1961 und 1969) liefern keine plausiblen Erklärungen auf Basis der verfügbaren Klimadaten. Es bleibt, wie schon für die Standorte des Mains dargelegt, das auslösende Ereignis unbekannt.

Zieht man für die Jahre 1921 und 1976 einen Vergleich zwischen den Spätholz-Weiserjahren des Rheins und des Mains, so fällt auf, dass die Spätholzbreiten aller Main-Standorte in diesen Jahren zu negativen Weiserjahren führen, die der Rhein-Standorte nur 1921. Erklärung dafür könnte sein, dass es am Main sowohl zu einer erheblichen Abnahme des Niederschlags als auch des Wasserstandes kam, während am Rhein nur der Wasserstand nicht aber aber die Niederschlagsmenge sank. Vergleicht man die Klima- bzw. die Pegelstandsdaten im Jahr 1921 zwischen dem Oberrheingebiet und dem Maingebiet, so finden sich kaum Unterschiede bezüglich der negativen Abweichungen während der Vegetationsperiode. Es zeigt sich ebenso, dass hohe Sommer-Temperaturen nicht alleinig für das geringe Wachstum des Spätholzes in Eichen ausschlaggebend sind: Die Sommer-Temperaturen des Jahres 1921 liegen, im Gegensatz zu 1976, markant niedriger - dennoch sind beide die Jahre als die Spätholz-“Jahrhundert“-Weiserjahre zu bezeichnen.

Die Auswertung der Frühholz-Weiserjahre (1932 und 1949) bleibt – wie schon für den Main – ohne Ergebnis (siehe Anhang). Bezieht man alle in dieser Arbeit untersuchten Standorte in die Spätholz-Weiserjahr-Auswertung ein, weisen in den Jahren 1921 (Rang 1) und 1976 (Rang 2) vier von fünf Standorte in Süddeutschland ein negatives Spätholz-Weiserjahr auf! Das negative Spätholz-Weiserjahr 1925 rangiert auf Rang 3.

Während geringe Niederschläge alle Eichen eines Gebietes treffen, haben Hochwasser-Ereignisse einen lokalen Effekt auf flussnahe Eichen. Betrachtet man die Auwald-Standorte des Rheins, die 1987 und 1999 nachweislich von extremen Sommer-hochwassern heimgesucht wurden, zeigen diese teils positive Spätholz-Weiserjahre. Für die betroffenen Eichen, die für 60 – 80 Tage mit bis zu 2 Meter Stammhöhe überflutet waren, kann demnach ein positiver Effekt bezüglich des radialen Wachstums festgestellt werden. Dieser Effekt tritt ebenso an Eichen des Freiland-Experiments auf.

Eichen an Standorten, die Winter-Hochwasser ausgesetzt sind, zeigen kein einheitliches Ergebnis. In den Wintern 1882/83, 1908/09, 1919/20 und 2002/03 kam es am Main zu besonders hohen Abflüssen. Ein nachweislich positiver oder negativer Effekt auf den radialen Spätholz- und Frühholzbreiten-Zuwachs durch Winter-Hochwasser kann nicht erkannt werden. Unerwähnt bleiben darf nicht, dass die Winter-Hochwasser am Main zwar durch hohe Abflussmengen charakterisiert sind, diese jedoch meist nur Tage oder wenige Wochen anhalten. Die Sommer-Hochwasser am Rhein sind dagegen charakterisiert durch meist wochenlange Überschwemmungen der Auen.

3.12 Zusammenfassung der Zusammenhänge zwischen holzanatomischen Anomalien und auslösenden Umweltereignissen

In diesem Kapitel wird die Eindeutigkeit holzanatomischer Anomalien bezüglich der auslösenden abiotischen bzw. biotischen Umweltereignisse zusammengefasst. Dieser Zwischenschritt ist notwendig angesichts der Absicht im nachfolgenden Kapitel – basie-rend auf subfossilen Eichen der HOC Hohenheim – Umweltereignisse in der Vergangenheit (Holozän) zu datieren. Tabelle 3-7 gibt Aufschluss über die Ursachen, auf die sich spezifische holzanatomische Anomalien zurück führen lassen.

Wie aus obiger Tabelle zu entnehmen ist, zeigen die Ergebnisse aus dem Eichen-Experiment und der Rezent-Studie gleiche Ursachen für die holzanatomischen Anomalien der Merkmale F, T und G und lassen sich daher eindeutig einer Ursache zuordnen.

Für die Merkmale C/D bzw. N/N+ fällt die Zuordnung nicht eindeutig aus: Das Eichen-Experiment und die Rezent-Studie liefern hinsichtlich der Ursache unterschiedliche Erkenntnisse, wobei dennoch jede Studie für sich genommen einheitliche Ergebnisse liefert.

Tab. 3-7: Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Eindeutigkeit der Ursache, der sich eine spezifische holzanatomische Veränderung im Eichen-Experiment bzw. in der Rezent-Studie zuordnen lässt. - VP = Vegetationsperiode; Plus(+) = eindeutig zuzuordnen; Minus(-) = nicht eindeutig zuzuordnen; X = Ermittlung nicht möglich.

Merkmal	Eichen-Experiment	Rezent-Studie	Eindeutigkeit
C / D	extreme Sommertrockenheit	Spätfrost (Beginn VP)	-
F	Spätfrost (früher Beginn VP)	Spätfrost (früher Beginn VP)	+
T	Spätfrost (früher Beginn VP)	Spätfrost (früher Beginn VP)	+
N / N+	Defoliation	extreme Sommertrockenheit	-
G	Sommer-Hochwasser	Sommer-Hochwasser	+
SEV	Frühjahrs-Hochwasser	X	X

Für das Merkmal SEV liefert das Eichen-Experiment ein sehr deutliches Ergebnis, wohingegen die Ursache in der Rezent-Studie aufgrund des fehlenden Vorkommens nicht untersucht werden konnte. Dennoch sind Rückschlüsse später möglich.

Tabelle 3-8 zeigt die erhobenen Merkmalskombinationen und die Zuordnung zu biotischen bzw. abiotischen Ursachen.

Tab. 3-8: Zusammenfassung der Ergebnisse bezüglich der Eindeutigkeit der Ursache, der sich eine Merkmalskombination zuordnen lässt. - VP = Vegetationsperiode; Plus(+) = eindeutig zuzuordnen; Minus(-) = nicht eindeutig zuzuordnen; X = Ermittlung nicht möglich.

Merkmals-kombination	Eichen-Experiment	Rezent-Studie	Eindeutigkeit
F / T	Spätfrost (früher Beginn VP)	Spätfrost (früher Beginn VP)	+
C / D / N	X	Spätfrost (Beginn bzw. inmitten VP)	X

Merkmal F und Merkmal T finden sich zumeist als eindeutige Kombination als Folge von Spätfrost-Ereignissen, die in einer sehr frühen Phase der Vegetationsperiode auftreten. Diese Merkmalskombination kommt sowohl im Eichen-Experiment als auch in der Rezent-Studie sehr einheitlich vor. Die Kombination der Merkmale C, D und N finden sich im Eichen-Experiment selten, dafür ist diese Merkmalskombination in der Rezent-Studie sehr häufig anzutreffen.

Bei Vergleich von Ergebnissen des Eichen-Experiments mit Rezent-Studie darf nicht außer Acht gelassen werden, dass das Baumalter sehr unterschiedlich ist.

Werden alle Ergebnisse aus der vorliegenden Untersuchung einbezogen, so kann zusammenfassend gesagt werden, dass:

(i) die Merkmale F und T bzw. deren Kombination auf Frost-Ereignisse zum frühen Beginn der Vegetationsperiode hinweisen,
(ii) die Merkmale C bzw. D durch Frost-Ereignisse (oder extreme Temperaturstürze) zu Beginn bzw. inmitten der Vegetationsperiode verursacht werden,
(iii) die Merkmale N bzw. N+ durch mehrmonatige extreme Trockenperioden,
(iv) das Merkmal SEV durch langanhaltende Frühjahrs-Hochwasser und
(v) das Merkmal G durch langanhaltende Sommer-Hochwasser verursacht werden können, außerdem
(vi) die Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße, die zum Beginn der Vegetationsperiode ausgebildet werden (Merkmal MVA5), durch Perioden sehr tiefer Winter-Temperaturen signifikant vermindert sind.

Basierend auf diesen Ergebnisse sollen anschließend derartige Ereignisse im Holozän datiert und deren Häufigkeitsverteilung über die Zeit ermittelt werden.

3.13 Ereignisdatierung mittels holzanatomischen Anomalien anhand subfossiler Eichen der HOC Hohenheim – Potenzial und Beitrag zur Klimaforschung

Die vorliegende Arbeit untersuchte holzanatomische Anomalien sowie holzanatomische Variablen. Die jeweiligen biotischen bzw. abiotischen Ursachen waren in einer Rezent-Studie untersucht und parallel durch gezielte Freiland-Experimente verifiziert worden. In diesem Kapitel sollen die Befunde Anwendung finden, in dem – anhand subfossiler Eichen der HOC Hohenheim – vergangene Ereignisse, wie beispielsweise Spätfröste, datiert und deren Häufigkeitsverteilung aufgezeigt werden. Damit können holzanatomische Studien einen Beitrag zur aktuellen Diskussion über die Klimavariabilität zumindest auf regionaler Ebene leisten. Die subfossilen Eichen stammen aus Fundorten an Rhein und Main, sind gut erhalten und zahlreich belegt.

3.13.1 Datierung von extrem kalten winterlichen Frostphasen am Oberrhein und Analyse ihrer zeitlichen Verteilung innerhalb einer 130-jährigen Periode des Holozäns

An zehn datierten subfossilen Eichen aus der Kiesgrube bei Lichtenau (Oberrhein) wurden mittels Bildanalyse-Verfahren (Kap. 2.11) die Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße gemessen. Die resultierende MVA5-Chronologie datiert in die Zeit von 2527 bis 2396 BC (4477-4346 cal BP). Abbildung 3-53 zeigt den Verlauf der indizierten MVA5-Chronologie mit Belegung und EPS.

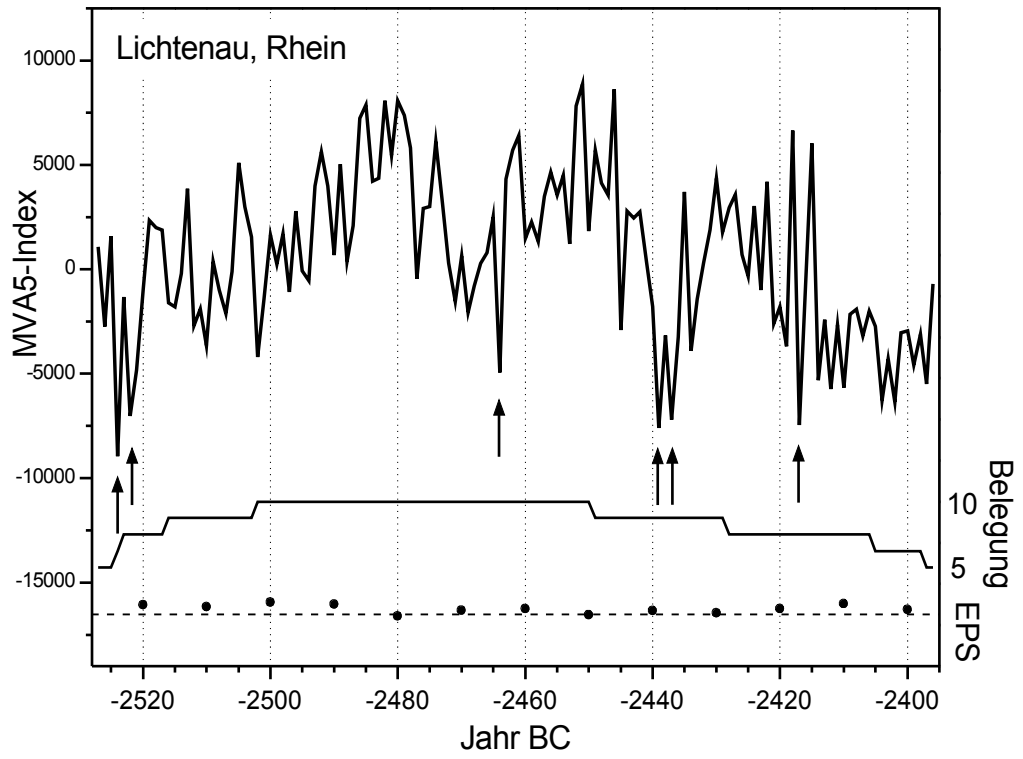


Abb. 3-53: MVA5-Chronologie (Mediane Gefäßfläche der fünf größten Tracheen aus der erster Frühholz-Reihe) zwischen 2527-2396 BC (132 Jahre). - Pfeile kennzeichnen extreme Abnahmen in der Gefäßfläche; Belegung: 6-10 Bäume; gestrichelte Linie: EPS = 0.85; kleine schwarze Punkte: EPS-Wert (Intervall: 20 Jahre mit 10-jährigem Überlapp); BC = vor Christus.

Betrachtet man den niederfrequenten Verlauf der MVA5-Chronologie, dann findet sich zu Beginn (2520 BC) und gegen Ende (2400 BC) je eine Phase mit geringen MVA5-Werten, während der MVA5-Index um 2450 BC ein Maximum zeigt. Deutlich ausgeprägte Phasen

mit mehrjährigen Einbrüchen in der MVA5-Chronologie finden sich zwischen 2524-2521, 2471-2464 und 2439-2436 BC; hohe Index-Werte sind in den Perioden zwischen 2486-2478 und 2452-2446 BC zu erkennen. Das EPS liegt nahezu über den gesamten Zeitraum oberhalb von 0,85 und zeigt damit ein gemeinsames Signal der vermessenen Eichen.

Im Rahmen der Rezent-Studie hat sich ein statistisch positiver Zusammenhang zwischen der holzanatomischen Variablen MVA5 und der mittleren April-Temperatur gezeigt.
Es ist hier auf die Berechnung einer Rekonstruktion der April-Temperatur explizit verzichtet worden, da dies Bestandteil eines DFG-Projekts ist und in einer weiteren Dissertation erarbeitet wird (für genauere Informationen siehe Abschlussbericht SPP 1266 „Holoflood“ oder Schönbein, 2011). In Einzeljahren mit besonders starker Reduktion der Frühholz-Gefäßflächen (Pfeile), weist diese – so zeigt die Rezent-Studie – auf extrem tiefe Temperaturen in den Wintermonaten hin. Derartige Winterfröste lassen sich demnach für die Jahre 2524, 2522, 2462, 2439, 2437 und 2417 BC datieren. Die Winterfröste verteilen sich nicht gleichmäßig über den untersuchten Zeitraum; in der ersten Hälfte finden sich deutlich weniger als in der zweiten.

Der untersuchte Zeitraum im Holozän entspricht einer Zeitspanne, für die die der Rezent-Studie erfolgen konnte (je ca. 130 Jahre). Beide Zeiträume können daher sehr gut hinsichtlich der Häufigkeit von Winterfrösten verglichen werden. Die Anzahl extrem kalter Phasen während der Wintermonate liegt im Rezent-Zeitraum nur unwesentlich höher als in der Periode des Holozäns.

3.13.2 Datierung und Analyse der zeitlichen Verteilung von Winter- und Frühjahrs- bzw. Sommer-Hochwasser im Maintal innerhalb einer über 1.000-jährigen Periode des Holozäns („4.7k-Event“)

An 47 subfossilen Eichen aus dem Maintal sind holzanatomische Anomalien aufgenommen worden; die erzielten Ergebnisse aus der Rezent-Studie sowie dem Eichen-Experiment bilden auch hier die Grundlage zur Ereignisdatierung für eine 1079 Jahre langen Untersuchungszeitraum von 3279 bis 2201 BC.
Die für diesen Zeitraum bildanalytisch vermessenen holzanatomischen Frühholz-Variablen (z.B. MVA5, MVA, CAabs) finden auch zur Klima-Rekonstruktion im Rahmen des DFG-Projekts SPP 1266 „Holoflood“ Verwendung.

Kriterien, wie (i) eine durchgängig hohe Belegung und (ii) eine abrupte Schwankung in der Gesamtringbreiten-Chronologie – die s zuvor in dieser Dimension nicht aufgetreten ist – führte zur Auswahl des Zeitraumes. Das subfossile Eichenmaterial ist auf Dichtebänder (Merkmale C, D), verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F), traumatische Gewebe (Merkmal T), schmale Frühholz-Tracheen (Merkmal SEV), traumatisch vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G) und auf lokale Verletzungen (Scars) untersucht worden. In Abbildung 3-54 sind die Ergebnisse dargestellt.

Wird die Eichen-Jahrringchronologie über den gesamten holozänen Zeitraum betrachtet (8200 BC bis 1000 AD) ist eine deutliche Zweiteilung zu sehen: Die durchschnittliche Jahrringbreite beträgt über 4900 Jahre hinweg (8200 -3301 BC) lediglich knapp eineinhalb Millimeter. In den folgenden 4000 Jahren zeigen sich erhebliche Zuwachsspitzen mit teilweise über vier Millimeter. Auch die Belegung der HOC Hohenheim unterliegt fortwährenden Schwankungen. Die Phasen von 2700 BC bis 1000 AD sind besonders geprägt von starken Belegungsschwankungen.

Innerhalb des Untersuchungszeitraums weist die Eichen-Jahrringchronologie bis ins Jahr 2750 BC relativ kontinuierliche Jahrringbreiten-Zuwächse auf; plötzliche starke Schwankungen sind nicht ausgeprägt. Im Bereich zwischen 2700-2601 BC ist eine deutliche Zunahme des radialen Zuwachses zu verzeichnen; während der letzten 400 Jahre im Untersuchungszeitraum fällt dieser erneut stark ab. Über eine Periode von 17 Jahren (2746-2730 BC) – kurz bevor die Jahrringbreiten abrupt zunehmen – ist eine markante Zuwachs-Reduktion sichtbar.

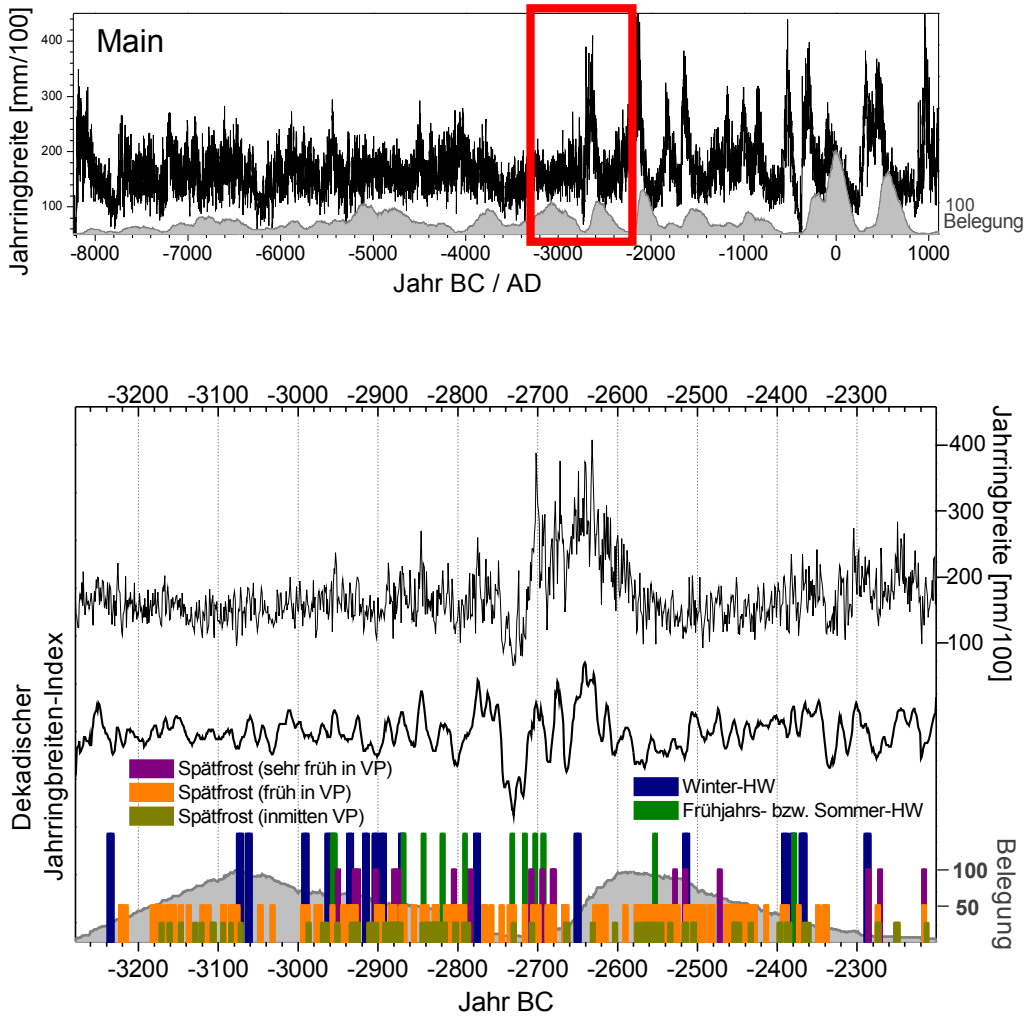


Abb. 3-54: Oben: Chronologie der absoluten Jahrringbreiten subfossiler Eichen am Main (schwarz) mit Angabe der Belegung (grau) (aus: Friedrich et al., 2004). Das rote Rechteck zeigt den hier untersuchten Zeitraum (3279-2201 BC; „4.7k-Event“) an. **Unten:** Chronologie der absoluten Jahrringbreiten (schwarz), dekadischer Jahrringbreiten-Index (schwarz, Indexierung durch 10-jährigen „Spline“) und Belegung (grau). Die Balken zeigen die Ereignisse an, die basierend auf holzanatomischen Anomalien datiert werden konnten (siehe Legende). Zur besseren Übersicht sind die datierten Ereignisse mit unterschiedlich hohe Balken dargestellt, diese lassen keinen Rückschluss auf die absolute Anzahl zu. - HW = Hochwasser; VP = Vegetationsperiode.

Die Ergebnisse der Rezent-Studie und des Eichen-Experiments zeigen übereinstimmend: langanhaltende Hochwasser in den Sommermonaten manifestierten sich in den Jahrringen als vergrößerte Spätholz-Tracheen (Merkmal G). Schmale Frühholz-Gefäße

(Merkmal SEV) erwiesen sich im Eichen-Experiment als klare Reaktion auf Frühjahrs-Hochwasser. Auch wenn in dieser Arbeit mit sogenannten „Scars“ (großflächige Verletzungen des Kambiums und des Holzkörpers) nicht gearbeitet worden ist, sollen sie dennoch an dieser Stelle einbezogen werden. Scars sind aus anderen Studien als Winter- bzw. Sommer-Hochwasser-Marker (je nach Lage im Jahrring) bekannt (z.B. Gottesfeld, 1996; Tardif und Bergeron, 1997; Zielonka et al., 2008).

Betrachtet man die Häufigkeitsverteilung der Winter- und Frühjahrs- bzw. Sommer-Hochwasser, so fällt sofort deren charakteristische Verteilung auf: Zu Beginn des Untersuchungszeitraumes finden sich gehäuft Winter-Hochwasser. Diese werden abgelöst von Frühjahrs- bzw. Sommer-Hochwasser, die hauptsächlich um das Jahr 2800 BC liegen. Zum Ende des Untersuchungszeitraums beherrschen abermals Winter-Hochwasser das Bild. Zwischen 2991 und 2650 BC (342 Jahre) liegen über die Hälfte der Hochwasser-Marker (19 von insgesamt 30); Winter- und Frühjahrs- bzw. Sommer-Hochwasser halten sich hinsichtlich deren Häufigkeit die Waage (9:10).

Die sehr hohe Anzahl an Hochwasser-Ereignissen lässt eine „Periode hoher Fluss-dynamik“ erkennen. Diese „Periode hoher Flussdynamik“ weist zu Beginn vermehrt Winter-Hochwasser auf, die von überwiegend Frühjahrs- bzw. Sommer-Hochwasser abgelöst werden. Acht der insgesamt zwölf datierten Frühjahrs- bzw. Sommer-Hochwasser gruppieren sich zwischen 2868-2693 BC (n=176). Diese Phase mit hoher Hochwasserfrequenz fällt zusammen mit der stetig fallenden Belegung der Eichen-Jahrringchronologie und auch mit steigender Variabilität der Jahrringbreiten. Mit steigender Belegung und zunehmenden Jahrringbreiten (nach 2693 BC) sinkt die Anzahl an Hochwasser-Ereignissen – und damit die Hochwasser-Frequenz – erneut ab.

Vergleicht man die Hochwasserfrequenz im untersuchten Zeitraum des Holozäns mit der Anzahl an Hochwasser-Ereignissen im 20. Jahrhundert, dann kann von einer deutlich höheren Hochwasserdynamik im 1.000-jährigen Zeitraum des Holozäns gesprochen werden.

3.13.3 Im Maintal während der Vegetationsperiode aufgetretene Fröste – Datierung und zeitliche Verteilung über eine 1.000-jährige Periode des Holozäns

Die Ergebnisse der Rezent-Studie und des Experiments zeigen deutlich, dass Frost am Anfang der Vegetationsperiode sich als verformte und kollabierte Frühholz-Tracheen (Merkmal F) bzw. traumatisches Gewebe (Merkmal T) manifestiert. Darüber hinaus ergab die Rezent-Studie, dass der Einfluss derartiger Fröste sehr vom Alter des Baumes abhängig ist. Bei den untersuchten subfossilen Eichen findet sich eine überaus hohe Anzahl an „Frostringen“ weit außerhalb des marknahen Bereichs.

Die Anzahl der „Spätfröste“ sehr früh in der Vegetationsperiode (Merkmal F/T) beläuft sich auf insgesamt 18 datierte Fälle (Abb. 3-54 unten). Auffällig ist das Auftreten derartiger Fröste erstmals ab dem Jahr 2950 BC. Zwölf Frost-Ereignisse traten im Zeitraum zwischen 2950-2680 BC (= 271 Jahre) auf und fallen – wie schon oben bei den Hochwassern dargestellt – in die selbe „Periode hoher Flussdynamik“. Im Folgezeitraum geht die Häufigkeit der Fröste deutlich zurück.

Dichtebänder zu Beginn (Merkmal C) und inmitten des Spätholzes (Merkmal D) zeigen nachweislich Frost-Ereignisse an. Im Gegensatz zu Merkmal F/T (Frost-Ereignis am Anfang der Vegetationsperiode) weisen Dichtebänder je nach Lage auf Frost-Ereignisse hin, die deutlich in die Vegetationsperiode hinein verschoben sind. Sie wurden in den subfossilen Eichen sehr häufig beobachtet. Um ihre Häufigkeit zu bewerten, ist eine „Güte“ (prozentualer Anteil der Dichtebänder in einem 31-jährigen gleitenden Zeitintervall) errechnet worden.

Phasen mit seltenen Frösten am Anfang der Vegetationsperiode (Merkmal C) wechseln sich mit Phasen gesteigerter Häufigkeit ab (3279-3183 BC gering, 3182-3076 BC häufig, 3075-2995 BC gering, 2994-2680 BC häufig, 2679-2577 BC gering, 2576-2428 BC sehr häufig und 2427-2201 BC gering). In der „Periode hoher Flussdynamik“ tritt eine Häufigkeit auf, die als vergleichsweise hoch bezeichnet werden muss (Abb. 3-55).

Die Anzahl der datierten Frost-Ereignisse inmitten der Vegetationsperiode (Merkmal D) ist sehr viel geringer. Auch hierfür finden sich Phasen mit geringerer und mit häufigerer

Ausprägung (3279-3172 BC gering, 3171-3072 BC häufig, 3071-2988 BC gering, 2987-2787 BC sehr häufig, 2786-2576 BC gering, 2575-2504 BC sehr häufig und 2503-2201 BC gering) (Abb. 3-55).

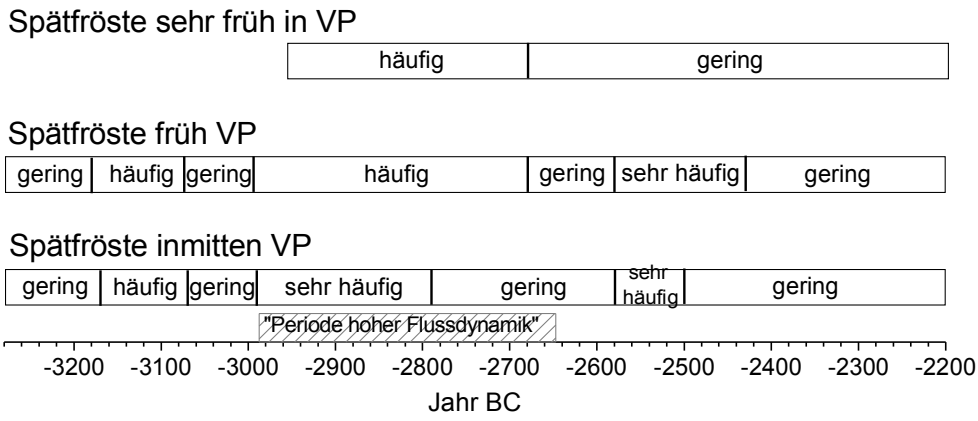


Abb. 3-55: Perioden mit Spätfrösten unterschiedlicher Häufigkeiten am Main im untersuchten Zeitraum zwischen 3279 und 2201 BC („4.7k-Event"), ermittelt anhand holzanatomischer Merkmale F/T, C und D. Der schraffierte Balken zeigt die „Periode hoher Flussdynamik", ermittelt anhand der holzanatomischen Merkmale SEV, G und Scars. - VP = Vegetationsperiode.

Die Analyse lässt erkennen, dass derartige Umweltereignisse in der Vergangenheit sehr wahrscheinlich wesentlich häufiger aufgetreten sind.

Die Studien an subfossilen Eichen zeigen eindrücklich, dass über die Holzanatomie vertiefte Einblicke in die Klimageschichte der Vergangenheit möglich sind, sogar saisonale Auflösung und die exakte Datierung der Art des Ereignisses (z.B. Spätfrost) können erzielt werden.

Kapitel 4 Diskussion

Erkenntnisse über das Klima der Vergangenheit und dessen zeitliche und räumliche Variabilität sind wichtige Voraussetzungen dafür, dass Fragen zu natürlicher oder anthropogener Klimaveränderung zuverlässig beantwortet und Modellberechnungen zu Zukunftsszenarios glaubwürdig interpretiert werden können. Im Fokus dieser Arbeit standen daher Fragen, wie sich unterschiedliche Umweltereignisse (z.B. Trockenperioden, Winterfröste oder Hochwasser) in der Holzanatomie rezenter Eichen (Rezent-Studie) manifestieren, für welche „Umweltsignale“ die Gefäßgrößen (Frühholz-Variablen) „codieren“ und inwieweit sich diese Umweltsignale in einem Freiland-Experiment (Verifikationsphase) verifizieren lassen. In einer dritten Phase – der Subfossil-Studie – fanden die Ergebnisse ihre Anwendung: Eine Ereignis-Analyse, anhand subfossiler Eichen der HOC Hohenheim, sollte zeigen, inwieweit derartige holzanatomische Veränderungen in subfossilen Eichen einen Beitrag zur Erforschung des Paläoklimas leisten können. Vergangene extreme Umweltereignisse konnten in zwei Perioden des Holozäns datiert und mit der Häufigkeit heutiger Ereignisse verglichen worden.

Es zeigte sich in der Untersuchung, dass spezifische Veränderungen in der Holzanatomie auf singuläre extreme Umweltereignisse zurück geführt werden können. Kontinuierliche – Jahr-zu-Jahr – Proxies, wie die Gesamtringbreite und die Frühholz-Variablen (z.B. mittlere Frühholz-Gefäßfläche (MVA), mediane Querschnittsfläche der fünf größten Frühholz-Gefäße (MVA5)), zeigen sehr großes Potenzial für die kontinuierliche Klimarekonstruktion. Holzanatomische Veränderungen, die nicht jedes Jahr in Erscheinung treten – diskontinuierliche Proxies –, wie vergrößerte Spätholz-Gefäße (Merkmal G), sehr schmale Frühholz-Gefäße (Merkmal SEV), Dichtebänder (Merkmal C, D), verformte bzw. kollabierte Frühholz-Gefäße (Merkmal F) und traumatisches Gewebe (Merkmal T), können eindeutigen Umweltereignissen zugeordnet werden und bieten die Möglichkeit, über Ereignis-Analysen zusätzliche Informationen über das Geschehen in der Vergangenheit zu erhalten. Die Anwendung der kontinuierlichen und diskontinuierlichen Proxies in Kombination könnte tiefgreifende Einsichten diesbezüglich eröffnen.

4.1 Kontinuierliche holzanatomische Veränderungen und deren Potenzial für die Klimarekonstruktion

Im folgenden werden die erzielten Ergebnisse der Klima-Wuchsbeziehungen, der Proxies Gesamtring-, Spätholzbreite und den Frühholz-Gefäß-Variablen mit einschlägigen Studien verglichen, deren Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede herausgearbeitet und diskutiert; es soll an dieser Stelle weniger auf exakte Korrelationswerte als auf den Zeitraum, in dem die Eichen signifikant auf einen Klimaparameter reagieren, eingegangen werden. Jahrring-Archive stehen seit langer Zeit im Fokus der Klimarekonstruktion. Die Vielzahl an Arbeiten zeigen ein ungebrochenes Interesse (z.B. Fritts, 1991; Schweingruber und Briffa, 1996; Briffa et al., 1998; Mann et al., 1998; Garfi, 2000; Esper et al., 2002; García-González und Eckstein, 2003; Mann und Jones, 2003; Luterbacher et al., 2004; Wilson et al., 2005; Esper et al., 2007; García-González, 2008; Fonti et al., 2009b; Büntgen et al., 2009; Mann et al., 2009; Büntgen et al., 2010). Das Wissen über die Variabilität des Klimas ist Fundamental für die Berechnung von Zukunftsszenarios durch Computermodelle. Hierzu ist es unabdingbar, die klimatischen Verhältnisse so genau als möglich – wünschenswert wäre hier, neben Daten mit jährlicher, auch Daten mit saisonaler Auflösung – rekonstruieren zu können. Zum Einen sind dafür Klimaarchive notwendig, die viele Jahrhunderte überdecken, als auch Erkenntnisse über die Klimasensitivität des jeweiligen Archivs selbst. Untersuchungen von Esper et al. (2002) zeigen beispielsweise, dass niederfrequente Signale zur Rekonstruktion der Jahresmittel-Temperatur genutzt werden können, Mann und Jones (2003) publizierten eine Rekonstruktion der Temperatur-Variabilität und -Extreme über mehrere Jahrhunderte und Luterbacher et al. (2004) rekonstruierten nicht nur jährliche sondern sogar saisonale Temperatur-Veränderungen auf Basis eines Multi-Proxy Ansatzes. Während Arbeiten zur Temperatur-Rekonstruktion – besonders zu Sommer-Temperaturen – häufig in der Literatur zu finden sind, liegen langreihige Rekonstruktionen des Niederschlags für Mitteleuropa seltener vor. Arbeiten von Büntgen et al. (2009) und Wilson et al. (2005) zeigen beeindruckend die Möglichkeiten von mehr-hundertjährigen Jahrringchronologien zur Niederschlags-Rekonstruktion für den Bayerischen Wald und für die Slowakei auf; basierend auf verschiedenen Nadelholzarten.

Vergleicht man die in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse der Klima-Wuchsbeziehungen (Abb. 3-6, Seite 58) bezüglich der Niederschlagssummen, so zeigen sich hoch signifikant positive Zusammenhänge zwischen den Monaten Mai, Juni, Juli und dem Gesamtringbreiten-Zuwachs. Die Korrelationsergebnisse zwischen der Abflussrate bzw. dem Wasserstand und dem radialen Zuwachs zeigen (für alle flussnahen Standorte) eine sehr

hohe positive Signifikanz, besonders innerhalb der Vegetationsperiode von April bis August. Die Korrelationsberechnungen zeigen im allgemeinen – für die untersuchten Eichen Süddeutschlands –, dass hohe Niederschlagssummen, hohe Abflussraten und hohe Wasserstände während der Sommermonate als die treibenden Wachstumsfaktoren hinsichtlich der Gesamtringbreite angesehen werden müssen. Die Temperatur stellt nur sehr vereinzelt einen statistisch belegbaren Einfluss auf die Gesamtringbreite dar.

Vergleicht man dies mit Befunden aus der Literatur, die sich mit Eichen (*Quercus* spec.) und deren Klima-Wuchsbeziehungen befassen, bestätigen sie die hier erzielten Ergebnisse nur teilweise. Die Untersuchungen von Eckstein und Schmidt (1974) an Eichen (*Q. robur*) in Nord-Deutschland und von Matisons und Brümelis (2012), Matisons et al. (2012) bzw. Matisons et al. (2013) in Litauen zeigen einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Gesamtringbreiten-Zuwachs und der Temperatur. Untersuchungen von z.B. Garfi (2000) an Eichen aus Italien (Sizilien, *Q. pubescens*), von Fonti et al. (2009b) an Eichen aus der Schweiz (Schweizer Alpen, *Q. petraea*) und Rozas (2005) an Eichen aus Nord-Spanien (*Q. robur*), zeigen einen signifikanten Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf den Ringbreiten-Zuwachs. Während sich nach Garfi (2000) ein deutlicher Winter-Einfluss sowohl gegenüber der Temperatur (positiv) als auch gegenüber dem Niederschlag (positiv) erkennen lässt, findet sich bei Rozas (2005) und Fonti et al. (2009b) ein signifikant positiver Einfluss des Sommer-Niederschlags, was den Ergebnissen dieser Arbeit entspricht. Untersuchungen von Friedrichs et al. (2009a) an einem Eichen-Netzwerk in Deutschland zeigen Zusammenhänge zum Niederschlag und Dampfdruck im Monat Juni. Sie zeigten ebenso, dass diese Zusammenhänge während des 20. Jahrhunderts in den 1940iger Jahren nicht mehr vorliegen und damit die Komplexität des radialen Wachstums der Eichen auf. Erwähnt werden muss an dieser Stelle, dass der „self-calibrating Palmer Drought Severity Index“ (scPDSI) für die Monate Vorjahres-Juni bis August sichtbar positiv signifikant mit dem Gesamtringbreiten-Wachstum korreliert (Friedrichs et al., 2009a; Fonti et al., 2009b). Im Rahmen dieser Arbeit ergaben sich dagegen mit diesem Parameter keine signifikanten Zusammenhänge. Weitere Arbeiten von z.B. Pilcher und Gray (1982), Laible (1987), Bednarz und Ptak (1990), Nola (1996), Rozas (2001), Land (2003) und Büntgen et al. (2010) an unterschiedlichen Eichenarten (*Q. robur* und *Q. petraea)* aus Süd-, Mittel- und Nord-Europa kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Es kann daher festgehalten werden, dass das Klimasignal der Gesamtringbreite vermehrt durch den Sommer-Niederschlag (Mai - August) beeinflusst ist (bei Büntgen et al., 2010 durch den scPDSI). Hohe Niederschlagssummen während der Sommermonate liefern die

höchsten Korrelationswerte, unabhängig von der Eichenart oder den Standortseigenschaften.

Die Unterschiede, die sich in den Untersuchungen immer wieder zeigen, könnten vor allem in der unterschiedlichen Methode zur Trendbereinigung (Eliminierung des Juveniltrends) liegen. Je nach Methode könnten beispielsweise niederfrequente Klimasignale in den Chronologien eliminiert worden sein. Berechnungen von Klima-Wuchsbeziehungen, die sowohl Zusammenhänge zwischen den niederfrequenten als auch den hochfrequenten Signalen hervorbringen, wären das Mittel der Wahl (z.B. Esper et al., 2002; Fonti et al., 2009b).

Wie im obigen Abschnitt deutlich wurde, lassen sich Einflüsse sowohl der Temperatur als auch des Niederschlags auf die Gesamtringbreite feststellen. Um die Frage anzugehen, ob sich ein „Temperatur-Signal“ in den Proxies der Frühholz-Gefäßgrößen finden lässt, sind im Rahmen dieser Arbeit Klima-Wuchsbeziehungen (Tab. 3-1, Seite 68) zwischen den Proxies mittlere jährliche Gefäßgröße (MVA), mediane jährliche Querschnittsfläche der fünf größten Frühholz-Gefäße (MVA5), absolute Leitquerschnitts-Fläche (CAabs) und monatlichen Mittelwerten verschiedener Klimaparameter (Temperatur, Niederschlag, scPDSI, Abfluss und Wasserstand) errechnet worden. Einen signifikant positiven Einfluss auf die mittlere Querschnittsfläche (MVA) und auf die mediane Querschnittsfläche der fünf größten Frühholz-Gefäße (MVA5) zeigte die mittlere April-Temperatur; wohingegen die mittlere Mai-Temperatur einen negativen Effekt auf den absoluten Leitquerschnitt (CAabs) aufwies. Die Berechnungen lassen auch einen deutlichen regionalen Charakter erkennen: Die erstellten Master-Chronologien der Regionen Main und Donau zeigen Gleichsinnigkeit hinsichtlich des mathematischen Zusammenhanges; die der Region Rhein ist klimatisch weniger sensitiv. Weiterführende und ergänzende Sensitivitäts-Studien sind von Schönbein (2011) (Klimaforschungsprojekt SPP 1266 INTERDYNAMIK Projekt „Holoflood“) auf Tagesdatenbasis errechnet worden; die Chronologien der jeweiligen Frühholz-Variablen stammten aus der vorliegenden Arbeit. Hierzu ist ein MATLAB-Skript erstellt worden, das die Tagesmittelwerte der Klimavariablen innerhalb verschieden langer Zeitfenster aggregiert und Korrelationen mit den entsprechenden Frühholz-Variablen errechnet (Schönbein, 2011); diese Methode garantierte ein präziseres Analyseverfahren. Im Zeitfenster vom 1. April bis 21. April zeigte der mathematische Zusammenhang zwischen den Frühholz-Variablen MVA5 bzw. MVA und der Tageshöchsttemperatur mit einem Korrelationskoeffizienten von r = 0,46 bzw. r = 0,41 deutliche Signifikanz (Schönbein, 2011) und große Ähnlich-

keiten zur vorliegenden Untersuchung. Ein weiterer Beleg für die Sensitivität der Frühholz-Proxies gegenüber einem überregional wirkenden Faktor, wie ihn die Temperatur sicherlich darstellt, könnte in der Synchronität der MVA5-Masterchronologien der Regionen Rhein, Main und Donau zu finden sein (Abb. 3-11, Seite 65). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und die von Schönbein (2011) werden durch Untersuchungen von Fonti und García-González (2004) und Fonti et al. (2007) (*Castanea sativa*, Schweizer Alpen) bestätigt. Fonti et al. (2009b) (*Q. petraea*, Schweizer Alpen) fanden frequenzabhängige Zusammenhänge zwischen der mittleren Querschnittsfläche der Frühholz-Gefäße aus der ersten Frühholzreihe mit der Temperatur sowie mit dem scPDSI des Herbstes (Vorjahr) und Winter. Andere Quellen berichten von signifikanten Zusammenhängen zwischen der mittleren monatlichen Niederschlagssumme (Frühjahr) und verschiedenen Frühholz-Variablen in *Q. robur*, *Q. petraea* und *Q. pubescens* (z.B. Orcel et al., 1993; García-González und Eckstein, 2003; Fonti und García-González, 2008). Der Effekt des Niederschlags auf die Querschnittsflächen von Gefäßen ist auch aus Arbeiten an *Fagus sylvatica* (Sass und Eckstein, 1995), an *Quercus ilex* (Campelo et al., 2010) und *Quercus macrocarpa* (Woodcock, 1989) bekannt.

Angesichts der aufgeführten Literatur erscheint die deutliche Temperatur-Abhängigkeit der Frühholz-Gefäßfläche der Eichen aus dieser Arbeit und aus Schönbein (2011) überraschend, deckt sich aber mit Ergebnissen von Matisons und Brümelis (2012) und Matisons et al. (2012), die an Eichen einen Einfluss der Temperatur in den Winter- und Frühjahrsmonaten auf die mittlere Gefäßgröße aufgezeigt haben. Zu bedenken ist jedoch die Vielfältigkeit der aufgeführten Untersuchungen bezüglich Baumart, Standort und klimatischen Gegebenheiten. Ein weiterer Beleg für die Abhängigkeit der Frühholz-Variable MVA5 zur Temperatur zeigt sich in der Tatsache, dass die MVA5-Chronologien der Regionen Rhein, Main und Donau sehr synchrone, niederfrequente Schwankungen aufweisen. Es darf daher ein „triggern“ eines überregional wirkenden Klimafaktors (z.B. Nordatlantischen Oszillation) vermutet werden.

Eine Versuchseiche, die Trockenstress im Freiland-Experiment ausgesetzt war, weist keinerlei signifikante Veränderungen hinsichtlich der Querschnittsfläche der Frühholz-Variable MVA5 auf. Hingegen konnten Fonti et al. (2013), in einem Trockenstress-Experiment, eine sehr deutliche Reduktion in den Querschnittsflächen der fünf größten Frühholz-Gefäßen in *Q. robur* und *Q. petraea* experimentell erzeugen; in einer weiteren Eichenart, *Q. pubescens*, fiel die Reduktion deutlich geringer aus. Die diversen Untersuchungen zeigen,

dass weiterer Klärungsbedarf besteht. Artbedingte Unterschiede in den physiologischen und ökologischen Vorgängen, sowie Anpassungen des Phytohormonsystems (Contran et al., 2013), könnten die unterschiedlichen Ergebnisse erklären. Ebenso die recht kurze Zeitspanne von 4-5 Wochen, in der sich die Frühholz-Gefäße ausdifferenzieren (Zasada und Zahner, 1969) und ein Klimasignal „gespeichert“ werden kann, muss hierbei betrachtet werden. Die Querschnittsfläche der Frühholz-Gefäße steigt mit Erhöhung der Phytohormonkonzentration von Auxin (IAA) – bis zu einem gewissen Grad – stetig an; gleichfalls kontrolliert es die Initiation (Zakrzewski, 1991). Die physiologische Erklärung, wie verschiedene Klimafaktoren die Frühholz-Gefäßgrößen beeinflussen, kann nur durch Studien abschließend aufgeklärt werden, die die Zellentwicklung über die Vegetationsperiode hinweg untersuchen (z.B. Rossi et al., 2007). Die Ausbildung spezifisch großer Frühholz-Querschnittsflächen hängt demnach von vielen Faktoren ab (z.B. Temperatur, Wasserstatus, soziale Stellung). Ebenso spielen physiologische Prozesse schon Wochen, wenn nicht sogar Monate, zuvor eine entscheidende Rolle (Fonti et al., 2007). Sehr wichtig für die Diskussion möglicher klimatischer Ursachen, ist die Erkenntnis, dass die jährlich neu determinierte Frühholz-Gefäße bereits schon vor dem Knospenbruch und der Blattentfaltung angelegt werden, wie Studien von Bréda et al. (1993) und Suzuki et al. (1996) zeigten. Die Entwicklung der Frühholz-Gefäße ist zudem stark von den Konditionen (z.B. Kohlenstoff-Allokation) der vorangehenden Wachstumsperioden abhängig (z.B. Barbaroux und Bréda, 2002). Vorstellbar – bei vergangenen ungünstigen Wachstumsperioden – könnte eine limitierende Mobilisation von Reservestoffen sein, durch die die Querschnittsflächen auf nicht-klimatische Art und Weise beeinflusst werden kann. Schrader et al. (2004) und Aloni (1982) belegen in ihren Studien, wie intrazelluläre Prozesse vor der Wachstumsperiode die spätere Entwicklung von Frühholz- Gefäßen entscheidend beeinflussen können. In diesen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass, vornehmlich in warmen Perioden vor dem Monat April, Gene exprimiert werden, die für Auxin-Carrier-Moleküle codieren und damit die Sensibilität gegenüber IAA steigern. Bei höherer Auxin-Sensibilität der Zellen nimmt die Geschwindigkeit des Differenzierungsprozesses zu und resultiert in geringeren Zellgrößen, und damit in geringeren Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße (Schrader et al. 2004; Aloni, 1982). Ein Absterben großer Mengen an Blattknospen während extrem kalter Winterperioden könnte demnach großen Einfluss auf die Menge an produziertem Auxin und damit auf die Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße haben, was das Phänomen von „MVA5-Weiserjahren“ (Abb. 3-14, Seite 70) erklären könnte. Der Determinationszeitpunkt liegt weit vor dem Umsetzungszeitpunkt.

Ein wichtiger Aspekt für die Rekonstruktion des Klimas ist die Wahrscheinlichkeit (statistischer Fehler), mit der die getroffenen Aussagen auf die Grundgesamtheit zutreffen. Zwei statistische Parameter, an denen dies ermittelt werden kann, sind EPS (Expressed Population Signal) und rbar (Korrelation zwischen den Serien). In der vorliegenden Arbeit erwies sich eine Belegung – für die Gesamtring- und Spätholzbreiten – zwischen 15-30 Eichen je Standortschronologie als ausreichend. Dies zeigen auch Studien von Fonti und García-González (2008) und García-González und Eckstein (2003). Werden, neben rezentem Material, auch Bäume aus historischen oder früh-historischen Zeiträumen zur Rekonstruktion verwendet, verlangt dies teilweise eine deutlich höhere Belegung der Baumserien: Für die Rekonstruktion des Niederschlags aus historischen und rezenten Eichen reichten Wilson et al. (2005) eine durchschnittliche Belegung von mindestens 20 Eichen. Büntgen et al. (2010) verwendeten zur Rekonstruktion der Sommertrockenheit über das letzte Millennium prä-historische, historische und rezente Eichen. Der geforderte EPS-Wert von 0,85 konnte mit 37 Eichenserien aus prä-historischer Zeit gerade noch erreicht werden, während bereits mit 20 Serien aus dem historischen und dem rezenten Zeitabschnitt der EPS-Wert deutlich darüber lag.

Um ein zufriedenstellendes gemeinsames Signal für die quantitative Holzanatomie (Frühholz-Variablen) zu erhalten – so die Ergebnisse dieser Arbeit – ist eine Belegung von deutlich mehr als zehn Eichen erforderlich (bei Probenbreite max. 4 mm). Diese Ergebnisse decken sich mit Untersuchungen anderer Autoren (z.B. García-González und Eckstein, 2003; Blanchard, 2008; Fonti und García-González, 2008; Fonti et al., 2009a; Fonti et al., 2009b). Für Messungen an Eichen aus historischen Zeiträumen kann derzeit keine Aussage getroffen werden; Studien darüber liegen nicht vor, sollten aber unbedingt angegangen werden. Grundlagenstudien von Fonti et al. (2009a) an Eichen zeigen, dass neben der Belegung einer Chronologie, auch die Anzahl der vermessenen Frühholz-Gefäße bzw. die Breite des vermessenen Radius in Betracht gezogen werden muss. Sie konnten zeigen, dass bereits mit vier Eichen ein EPS von 0,85 deutlich überschritten werden kann, wenn die Messungen über eine Breite von 40 mm angelegt sind, und damit die Anzahl der gemessenen Frühholz-Gefäße sehr hoch war. Fonti et al. (2009a) gaben in dieser Arbeit einen „Richtwert“ von 7-12 mm an, auf dessen Breite die Frühholz-Gefäße gemessen werden könnten, damit ein hohes gemeinsames Signal entsteht. In Anbetracht dieser Erkenntnisse können Untersuchungen auch an geringer belegten Serien durchgeführt werden, die – wenn man die Belegungsschwankungen der HOC Hohenheim und die Heterogenität des subfossilen Probenmaterials betrachtet – dennoch statistisch abgesicherte

Aussagen über die Grundgesamtheit zulassen. Messungen der Querschnittsflächen von Frühholz-Gefäßen in subfossilen Eichen, die in dieser Arbeit und weiterführend in dem Klimaforschungsprojekt „Holoflood“ an Material aus Kiesgruben des Rheins und des Main erstellt worden sind, sind einzigartig. Es können daher an dieser Stelle ausschließlich die eigenen Ergebnisse diskutiert werden: Das verwendete subfossile Eichenmaterial (siehe DFG-Abschlussbericht SPP 1266 INTERDYNAMIK Projekt „Holoflood“) stammte aus Kiesgruben entlang der Flüsse Rhein bzw. Main. Wie die Grafik im Ergebnisteil erkennen lässt (Abb. 3-53, Seite 145), ist eine Belegung von 6 bis 10 subfossilen Eichen ausreichend, um den geforderten EPS-Wert kontinuierlich zu überschreiten; die Breite der Proben (ca. 20 mm) wurde aufgrund der Erkenntnisse von Fonti et al. (2009a) gewählt und belegt deren Aussage. Messungen an 10 subfossilen Eichen aus Kiesgruben des Mains ergaben – bei ähnlicher Probenbreite – keine kontinuierliche Überschreitung des EPS-Werts von 0,85. Da die Belegung einer subfossilen Eichen-Chronologie mitunter nicht erhöht werden kann, da die Probenanzahl dies evtl. nicht zulässt, könnte die Verbreiterung der Messradien (größer 20 mm) eine Möglichkeit bieten, den EPS-Wert zu erhöhen. Weitere Studien müssen hierzu erfolgen, um Klima-Wuchsmodelle auf sichere statistische Basis zu stellen.

Für die Zukunft müssen sicherlich alle Möglichkeiten der Statistik ausgeschöpft werden. Angefangen von einer sinnvollen Alterstrendbereinigung der quantitativen Frühholz-Chronologien bis hin zu Frequenz- und Hauptkomponenten-Analysen, um die enthaltenen Klimasignale auflösen zu können und die Modelle zur Klimarekonstruktion zu verbessern (z.B. Jones et al., 2009). Auch den Ansatz eines „atmospheric circulation tree-ring index“, der einen Zusammenhang zwischen Großwetterlagen und Jahrringwachstum aufzeigt, wie ihn Schultz und Neuwirth (2012) vorgestellt haben, hat großes Potenzial. Im gleichen Zuge sollte forciert werden, die bereits existierenden mehr-hundertjährigen Frühholz-Chronologien von Fonti et al. (2009b) und Land/ Friedrich (unpubliziert) auf Schwankungen im nieder- und hochfrequenten Bereich zu vergleichen, um neue Erkenntnisse zur regionalen und überregionalen Abhängigkeit und hinsichtlich klimadynamischer Prozesse (z.B. der „Nordatlantischen Oszillation“) zu erlangen. Eine Datenanalyse gleicher Methodik ist erstrebenswert, da unterschiedliche methodische Ansätze selbst in homogenen Jahrringdaten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können (Friedrichs et al., 2009b).

4.2 Diskontinuierliche holzanatomische Veränderungen (holzanatomische Anomalien) und deren Potenzial für die Ereignisdatierung

Wie die Berechnungen der Klima-Wuchsbeziehungen zwischen verschiedenen „Eichen-Proxies“ und Klimaparametern zeigen, sind die statistischen Zusammenhänge moderat und enthalten hohe statistische Fehler (Schönbein, 2011). Um das Klima der Vergangenheit besser zu beschreiben, könnte sich daher ein Multi-Proxyansatz eignen, in dem kontinuierliche und diskontinuierliche Eichen-Proxies gleichzeitig Verwendung finden. Ein Argument gegen diskontinuierliche Analysen könnte der Verlust der jährlichen Auflösung der Zeitserien sein, was in Anbetracht dekadischer Rekonstruktionen (z.B. Michaelsen, 1989; Mann et al., 1998; Esper et al., 2002; Esper et al., 2007; Naughton et al., 2007; Büntgen et al., 2009; Trouet et al., 2009) aber immer noch eine sehr hohe zeitliche Auflösung garantieren würde.

Bereits Becker et al. (1991) wiesen für Eichen den Zusammenhang zwischen negativen bzw. positiven Jahrringsignaturen und Wetteranomalien nach. Untersuchungen von Schweingruber et al. (1991) zu „Weiserjahren als Zeiger extremer Standortseinflüsse“ ergaben weitere Einblicke zur Berechnung und Interpretation (für eine Zusammenfassung früherer und neuerer Bezeichnungen, die die verschiedenen Autoren verwenden, sei auf Schweingruber et al. (1990) verwiesen). Negative Ringbreiten-Weiserjahre – so die Ergebnisse aus der vorliegenden Dissertation – weisen auf übergeordnete klimatische Ereignisse als auslösende Faktoren hin (Abb. 3-52, Seite 139); die synchrone Ausbildung von negativen Ringbreiten-Weiserjahren (hier Spätholzbreite) in den Regionen Rhein und Main unterstützt diese Aussage; stark positive (1914, 1927, 1932, 1961, 1969) und stark negative (1921, 1925, 1929, 1934, 1954) Spätholzbreiten-Weiserjahre treten synchron über weite Teile Zentraleuropas auf (Neuwirth et al., 2007). Warme und trockene Sommer werden als Auslöser für stark negative Ringbreiten-Weiserjahre gesehen (Schweingruber et al., 1991; Knapp et al., 2002; Hansen, 2003; Corcuera et al., 2004; Neuwirth et al., 2007); dies belegt auch die vorliegende Untersuchung. Intra-annuelle Wachstumsanalysen während des Trockenjahres 2003 von van der Werf et al. (2007) an *Q. robur* zeigten einen radialen Zuwachsstopp mit Beginn der Trockenperiode Ende Juli. Weiteres Zellwachstum im Spätholz fand bis zum Ende der Vegetationsperiode kaum noch statt. Die dadurch entstandene Reduktion der Spätholzbreite in solchen extremen Trockenjahren (van der Wert et al., 2007) unterstützt die hier erzielten Ergebnisse und die Interpretation der Weiserjahranalyse. Das Potenzial für zukünftige Untersuchungen könnte in der

Ereignisdatierung von Vegetationsperioden mit starken Niederschlagsanomalien liegen, die – wenn das subfossile Material der HOC Hohenheim herangezogen wird – sich regional (Rhein, Main, Donau) und zeitlich (mehrere Millennia) in ihrem Auftreten katalogisieren lassen könnten, ähnlich der Arbeit von Knapp et al. (2002), die dies für Trockenereignisse über einen Zeitraum von 500 Jahren – mit räumlicher und zeitlicher Verteilung – in den USA zeigten.

Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse (Abb. 3-51, Seite 135) hinsichtlich regionaler und überregionaler „Anomalie-Weiserjahr“ (Jahre, in denen holzanatomische Veränderungen im selben Jahr sehr gehäuft auftreten) stehen bislang aufgrund fehlender Vergleichsstudien relativ isoliert. Ebenso wie Spätholzbreiten-Weiserjahre eher durch großräumig-klimatische Ereignisse als durch standortsabhängige verursacht sind, lässt sich dies auch für „Anomalie-Weiserjahre“ sagen. Zwischen 1900 bis 2000 traten spezifische Veränderungen in der Holzanatomie in den Jahren 1913, 1921, 1934, 1941/42, 1948, 1953 und 1976 regional bzw. überregional in Erscheinung (z.B. Spätfrost im Jahr 1913).

Inwieweit diese überregionalen Temperatur- und Niederschlagsanomalien sich in Veränderungen der Holzanatomie außerhalb Süddeutschlands in Eichen finden, kann an dieser Stelle nicht gezeigt werden, dies ist aber sehr wahrscheinlich (mündliche Mitteilung Leuschner, 2009). Beiläufig erstellte Untersuchungen des Verfassers an Eichenproben aus Holland (z.B. 1913 → „Frostmarker“ (Merkmal F/T) und 1953 → „Frostmarker“ (Merkmal C)) sind ein Indiz dafür. Holzanatomische Veränderungen in Eichenmaterial aus den Laboren Spaniens (García-González), der Schweiz (Fonti), Hollands (Sass-Klaassen) und Deutschlands (Land, Friedrich, Leuschner) könnten zusammen getragen werden, um damit eine „Ereigniskarte“ zu erstellen. Die mehr-hundertjährige Spessarteichen-Chronologie (Hohenheim) und die mehr-hundertjährige Eichen-Chronologie (Schweiz, siehe Fonti et al., 2009b) könnten als erste Untersuchungsobjekte hierfür dienen.

Zellveränderungen in Bäumen – als „Zeiger“ für extreme Umweltereignisse – sind in der Paläoklimatologie vielfach beschrieben (z.B. Yanosky, 1983; Astrade und Begin, 1997; Tardif und Bergeron, 1997; St. George und Nielsen, 2002; St. George und Nielsen, 2003; St. George et al., 2006). Dass Veränderungen in der Zellstruktur, -größe, -anordnung und im physiologischen Verhalten der Bäume von den jeweiligen Umweltbedingungen abhängen können, belegen zahlreiche Studien (z.B. Gomes und Kozlowski, 1980; Leuschner und Schweingruber, 1996; Tyree und Cochard, 1996; Hauser, 1998; Lovisolo

und Schubert, 1998; Utsumi et al., 1999; Fotelli et al., 2000; Schmull und Thomas, 2000; Thomas und Gausling, 2000; Gieger und Thomas, 2002; Wimmer, 2002; Blanchard, 2008; Gea-Izquierda et al., 2012).

Eine signifikante Veränderung in der Holzanatomie durch Insektenkalamitäten (z.B. Schwammspinner simuliert durch Entlaubung), ließ sich in der Rezent-Studie nicht feststellen. Vermutungen, dass Insektenkalamitäten sich in der Holzstruktur von Eichen widerspiegeln, führen Leuschner und Schweingruber (1996) auf. Sie sprechen von tracheidalen Bändern (Dichtebänder) im Anschluss an das Frühholz, die auf Maikäfer-Kalamitäten hinweisen und die Annahmen von Christensen (1987) diesbezüglich bestätigen. Hauser (1998) hingegen erkennt in ihrer Arbeit über holzanatomische Anomalien in Eichen keinen sicheren Zusammenhang zwischen Massenvermehrungen von pflanzenfressenden Insekten und Dichtebändern. In den durchgeführten Freiland-Experimenten wurde in denjenigen Eichen, an denen eine komplette Entlaubung durchgeführt wurde, der radiale Zuwachs unverzüglich eingestellt; die Messungen des diametralen Stammzuwachses (Dendrometer) belegen dies. Dichtebänder fanden sich in keiner Defoliations-Eiche des Freiland-Experiments. Jahre, in denen vermehrt Dichtebänder (Merkmale C, D) in der Rezent-Studie ermittelt wurden, korrelieren mit abrupten Temperaturstürzen zum Beginn der Vegetationsperiode zwischen Mai und Juni, je nach Lage der Dichtebänder. Ein Absinken der Tagesminimum-Temperaturen über mehrere Tage hinweg auf knapp über den Gefrierpunkt – an einigen Standorten evtl. unter Null Grad Celsius und damit evtl. ein Frost-Ereignis – wurde als Auslöser gesehen. Je weiter der Zeitpunkt des Temperatursturzes in die Vegetationsperiode hinein verschoben war, desto weiter lagen die Dichtebänder im Spätholz. Die publizierten Ergebnisse lassen hierzu keine eindeutigen Schlussfolgerungen zu und demonstrieren die sehr heterogene Erkenntnislage. Die Datierung extremer Temperaturstürze in vergangenen Zeitepochen anhand von Dichtebändern erscheint dem Verfasser dennoch möglich; Untersuchungen auf regionalem bzw. über regionalem Niveau scheinen hier wesentlich klarere Ergebnisse zu liefern (siehe diese Arbeit).

Eindeutige Ergebnisse zu Veränderungen in der Holzanatomie zeigen sich hinsichtlich der Reaktion gegenüber Spätfrost- und Hochwasser-Ereignissen. Untersuchungen belegen die Auswirkungen von Frost-Ereignissen auf die Entwicklung von Xylemelementen während ihrer Differenzierung. Frost führt zur Zerstörung des Protoplasmas durch Wasserentzug aus dem umliegenden Gewebe. Infolge dessen kommt es zu Lufteinlagerungen (Embolien) und die Xylemelemente können kollabieren, werden durch Thylleneinlagerungen

verschlossen und damit funktionslos (Häsler, 1988; Cochard und Tyree, 1990; Larson, 1994; Tyree und Cochard, 1996; Utsumi et al., 1999). Nach Kavitation in den Frühholz-Gefäßen des aktuellen Jahres können Xylemelemente der Vorjahre, zumindest teilweise, reaktiviert werden, die dann wieder am Wassertransport beteiligt sind (Cochard und Tyree, 1990; Granier et al., 1994). Die gemessenen täglichen Stammdurchmesseränderungen im Eichen-Experiment (Abb. 3-28, Seite 98) zeigen sehr deutlich, dass die Übernahme des Wassertransports durch Gefäße der Vorjahre nicht der Wassertransportleistung entsprechen, wie dies mit funktionierenden Gefäßen im Frühjahr des aktuellen Jahres der Fall wäre; die täglichen Stammzuwachsänderungen liegen während der gesamten Vegetationsperiode in einem sehr hohen Bereich (teilweise über 2% bezogen auf den gesamten Stammdurchmesser). Steppe und Lemeur (2007) belegten, dass wenige, große Gefäße deutlich mehr Wassertransportleistung erbringen als viele, kleine Gefäße. In den Versuchseichen traten kollabierte Frühholz-Gefäße (Xylemelemente) – teils als Kombination mit traumatischem Gewebe – sehr deutlich als Reaktion auf Frost-Ereignisse während früher Phasen der Vegetationsperiode auf. Die durchgeführten Studien von Leuschner und Schweingruber (1996), Hauser (1998) und Schweingruber (2001) bestätigen diese Befunde. Nicht nur die Rezent-Studie brachte sehr klare Ergebnisse hervor, sondern auch im Freiland-Experiment konnte diese Art der holzanatomischen Veränderung – bzw. die Kombination von kollabierten Frühholz-Gefäße (Merkmal F) und traumatischem Gewebe (Merkmal T) – als Auslöser eindeutig verifiziert werden. Die exakte Zuordnung zu einem spezifischen Umweltereignis macht diese Art der holzanatomischen Veränderung zu einem sehr wichtigen Instrument für die Ereignisdatierung. An dieser Stelle sollte darüber diskutiert werden, innerhalb welcher Zeitspanne ein derartiges Frost-Ereignis statt finden muss, damit es holzanatomisch manifestiert werden kann. Betrachtet man die Tatsache, dass dies nur während der Ausdifferenzierung der Frühholz-Gefäße statt finden könnte, so engt sich diese Zeitspanne auf ca. 4 Wochen ein. In Untersuchungen von González-González et al. (2013) an *Q. robur* (Iberische Halbinsel) ergaben eine Dauer von einem Monat bis zur vollständigen Aufweitung der FH-Gefäße; Unterschiede zwischen den Individuen waren nicht feststellbar. Vor dem Hintergrund der Ereignisdatierung mittels dieser holzanatomischen Veränderung – bzw. der Kombination von Merkmal F und T –, muss daher berücksichtigt werden, dass die Phänologie, und damit Knospenbruch und Gefäßbildung, temperaturabhängig sind und während vergangener Zeiten wohl ebenfalls variabel waren (als Beispiel siehe Phänologiedaten in Henning-Müller, 2004-2006). Ein Ausbleiben des Merkmals F/T darf daher nicht mit der Annahme verknüpft werden, dass kein Frost-Ereignis statt gefunden hat; sondern erlaubt lediglich eine Aussage, dass während des

Zeitraums der Gefäßbildung kein extremes Frost-Ereignis auftrat. Werden die holzanatomischen Veränderungen – Merkmale F, T, C und D – kombiniert, verlängert sich der Zeitraum, innerhalb dessen ein Frost-Ereignis datierbar werden könnte, was wiederum zu einer verlässlicheren Interpretation von Klimaschwankungen führen würde.

Es wird angenommen, dass *Q. robur* und – in geringerem Maße *Q. petraea* – aufgrund spezieller Wachstumsprozesse in der Wurzel und durch die Anpassung der Blattbiomassenproduktion sehr hochwassertolerant ist, was diese Arte zum dominierenden Baum der Hartholzaue in Mitteleuropa seit vielen Jahrtausenden macht (z.B. Conner et al., 1998; Siebel et al., 1998; Blom, 1999; Schmull und Thomas, 2000; Parelle et al., 2006). Eigene Messungen – hinsichtlich des diametralen Stammzuwachses über die gesamte Vegetationsperiode – zeigten die geringen Unterschiede in der Wuchsdynamik zwischen den Hochwasser-Eichen (Abb. 3-28, Seite 98) und der nicht gefluteten Kontrolle, was von Kreye (2008) bestätigt werden konnten.

Die Frage, welche holzanatomische Veränderungen als Reaktion auf extreme Hochwasser in den Eichen auftreten können, liegt daher auf der Hand. Die Ergebnisse der Rezent-Studie und die Simulationen von langanhaltenden Überflutungen (bis 12 Wochen) im Freiland-Experiment zeigen eine signifikante Vergrößerung der Gefäße im Spätholz als Reaktion auf langanhaltende Sommer-Hochwasser. Dieser charakteristische „Sommerhochwasser-Marker“ wird in der gleichen holzanatomischen Ausprägung auch in Untersuchungen von Astrade und Begin (1997) (*Q. robur*) und Yanosky (1983) (*Fraxinus spec.*) beschrieben. Studien zur Reaktion auf Frühjahrs-Hochwasser finden sich bei Belien (2008) und St. George und Nielsen (2002), die signifikant reduzierte Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße ermittelten. Ihre Befunde ließen sich in den durchgeführten Freiland-Experimenten verifizieren (Abb. 3-29, Seite 100). Die Querschnittsflächen derjenigen Frühholz-Gefäße, die im überfluteten Stammabschnitt gebildet worden sind, liegen signifikant niedriger als die der Kontrollen.

Die Ausbildung von Xylemelementen wird kontrolliert von Wachstumsfaktoren, wie Auxin und verschiedenen Zuckern (Zimmermann und Brown, 1971; Aloni, 1987). Indol-Essigsäure (IAA) beeinflusst die Kambiumaktivität während der Gefäßentwicklung (Zakrzewski, 1991). Veränderungen hinsichtlich der Zellgröße und der Zellanzahl könnten durch anoxygene Bedingungen und durch die vermehrte Ausschüttung verschiedener Phytohormone (Ethylen, Auxin, Indol-Essigsäure) während der Überflutung verursacht werden (z.B. Tang

und Kozlowski, 1982; Yamamoto und Kozlowski, 1987). „Hochwasser-Marker“ für Frühjahrs- und Sommerhochwasser können – aufgrund der erzielten Ergebnisse aus der Rezent-Studie, dem Freiland-Experiment und der Ergebnisse anderer Untersuchungen aus der existierenden Literatur – als holzanatomische Veränderungen mit hohem Potenzial zur Datierung von extremen Hochwasser-Ereignissen in der Vergangenheit betrachtet werden.

Die Ausprägung holzanatomischer Veränderungen entlang der Stammhöhe und deren Abhängigkeiten vom Markalter fand bislang wenig Beachtung (z.B. Astrade und Begin, 1997; St. George und Nielsen, 2000; Wimmer, 2002). Eine korrekte Einschätzung über das Ausmaß und die zeitliche Verteilung von Umweltereignissen, ist nur in Verbindung mit einer genauen Analyse des eingesetzten Eichenmaterials möglich; dies zeigen die erzielten Ergebnisse dieser Arbeit. Weniger diejenigen holzanatomischen Veränderungen sollten im Fokus stehen, die beispielsweise von der Temperatur hervorgerufen sind, als diejenigen, die beispielsweise durch Hochwasser verursacht werden. Untersuchungen hierzu sollten zukünftig vermehrt Beachtung finden, da es sich hierbei um Grundlagenwissen handelt.

Bereits Fletcher (1975) und Tapper et al. (1978) berichten von Jahren mit abnormal kleinen Frühholz-Gefäßen (Querschnittsflächen), die die Autoren mit heftigen Winter- bzw. Frühjahrs-Frösten in Verbindung bringen, was später durch Leuschner und Schweingruber (1996) bestätigt werden konnte. Die Befunde dieser Arbeit zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen sehr geringen Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße aus der ersten Frühholzreihe und Perioden sehr tiefer Temperaturen im Winter. Auch Khasanov (2012) bestätigt dies in seiner Untersuchung an Eichen im europäischen Teil Russlands. Die erforderliche Länge der Periode konnte in der vorliegenden Arbeit auf mindestens 10 Tage bis mehrere Wochen in den Monaten Januar und Februar beziffert werden, was die Untersuchungen von Fletcher (1975), Tapper et al. (1978), Leuschner und Schweingruber (1996) und Khasanov (2012) bestätigen. Khasanov (2012) führte in seiner Untersuchung die starke Reduktion der mittleren FH-Gefäßfläche in den Jahren 1940 und 1956 auf extrem kalte Winter zurück. Diese Jahre ließen auch in der vorliegenden Arbeit auf den gleichen Effekt zurückführen. In Eichen (*Q. robur*) aus Gebieten ohne ausgeprägte Winter könnte eine starke Winter-Frühjahrs-Trockenheit (z.B. 1990 auf der Iberischen Halbinsel) verantwortlich für die Reduktion der Querschnittsflächen sein (García-González und Eckstein, 2003).

Im Rahmen dieser Arbeit konnten sechs Winterfrost-Ereignisse in einer 130-jährigen Periode von 2527 bis 2396 BC mittels derartiger „Frostzeiger“ datiert werden (Abb. 3-53, Seite 145). Nach Patzelt (1977), der postglaziale Klimaschwankungen untersuchte, handelt es sich bei dieser Periode um eine relativ warme Phase in den Alpen mit entsprechend geringen Gletschervorstößen und hochgelegener Baumgrenze; wodurch sicherlich keine genauen Rückschlüsse auf relativ kurze und sehr kalte Winter-Perioden gezogen werden können. Die HOC Hohenheim birgt großes Potenzial dadurch, dass subfossile Eichen gemeinsame Perioden aus verschiedenen Regionen Süddeutschlands abdecken (Rhein, Main, Donau) und „Winterfröste“ zeitlich und räumlich datiert und differenziert werden können, ähnlich wie dies Knapp et al. (2002) für Trocken-Ereignisse gezeigt haben.

4.3 Datierung extremer Umweltereignisse aus dem Holozän

Zeitlich hochaufgelöste Klimarekonstruktionen sind über die vergangenen zwei Millennia für viele Gebiete durchgeführt worden (z.B. Cook et al., 1998; Bräuning, 1999; Fischer et al., 1999; Charman und Hendon, 2000; Esper et al., 2002; Mann und Jones, 2003; Solanki et al., 2004; Casty et al., 2005; Touchan et al., 2007; Büntgen et al., 2010). Für Proxies mit zeitlich geringerer Auflösung (z.B. aus Eisbohrkernen) reicht die Rekonstruktion viele Jahrtausende zurück (z.B. Fischer et al., 1999; Rasmussen et al., 2006).

Die Hochwasser der vergangenen fünfhundert Jahre – anhand historischer Dokumentendaten ermittelt – zeigen in ihrer absoluten Höhe (Amplitude) und in ihrer Anzahl (Frequenz) große Variabilität (Glaser et al., 2010). Eine Einschätzung der Hochwasseraktivitäten und die genaue Datierung solcher – über den Zeitraum dokumentarischer Quellen weit hinaus –, scheint mittels hochauflösender Jahrring-Archive möglich. In der Periode um das „4.7k-Event“ zeigt sich in den subfossilen Eichen des Mains eine plötzliche Zunahme der absoluten Ringbreite (um 2700-2601 BC) – die in diesem Ausmaß in den vorherigen Jahrtausenden nicht vorkam – und in einer starken Belegungsschwankung (Spurk und Leuschner, 1999; Spurk et al., 2002; Friedrich et al., 2004) (Abb. 3-54, Seite 148). Die Gründe, die zu diesen Zunahmen führten, die sich in späterer Zeit mehrmals wiederholen, sind nicht abschließend geklärt; natürliche oder anthropogene Einflüsse könnten hierfür verantwortlich sein (Spurk und Leuschner, 1999; Spurk et al., 2002; Friedrich et al., 2004).

Die Anzahl der datierten Hochwasser-Ereignisse zwischen 3279 bis 2201 BC zeigt ein klares dreigeteiltes Bild: bis 2990 BC – und damit eine fast 300 Jahre umspannende Periode – konnten nur vereinzelt Winter-Hochwasser ermittelt werden. Innerhalb der folgenden 350 Jahre ergab sich eine gesteigerte Hochwasser-Aktivität. Die Anzahl datierter Hochwasser steigt sprunghaft an und kommt um 2650 BC zu einem vorläufigen Ende. Ab dem Jahr 2860 BC ergeben sich vermehrt Hinweise auf abrupt einsetzende Sommer-Hochwasser; dieser Trend hält für weitere 170 Jahre an. Nach einer Studie von Charman und Hendon (2000) lagen in dieser Zeit (2000 bis 2800 BC) die rekonstruierten Wasserstände in Feuchtgebieten Englands auf sehr hohem Niveau, was auf sehr kalte Winter und sehr nasse Sommer zurückgeführt wurde, die durch atmosphärische Zirkulationen getriggert worden sein könnten. Eine sehr detaillierte Rekonstruktion hydrologischer Verhältnisse (aus Polen) im Zeitraum des „4.7k-Events“ findet sich in Starkel (1995). Phasen gesteigerter Hochwassser-Aktivität ereigneten sich in den Zeiträumen zwischen 3500-2750 und 2500-2100 BC (hierzu siehe Publikationen in Starkel, 1995).

Die gesteigerte Hochwasser-Aktivität am Main fällt zusammen mit einer sinkenden Belegung der HOC Hohenheim: Der Fundrückgang lässt sich mit dem „Ausräumen“ vermehrt aufkeimender Eichen aus den Auen erklären (Spurk und Leuschner, 1999; Spurk et al., 2002). Über die letzten vier Jahrhunderte in der Untersuchungsperiode konnten immer weniger „Hochwasser-Marker“ datiert werden, was durch Niederschlagsanomalien erklärt werden könnte. Nach Booth et al. (2005) herrschte in dieser Phase (um 2250 BC) eine
inter-kontinentale „Mega-Trockenheit“ in Nord-Amerika und Afrika, die auf reduzierte Aktivitäten der Sonne und erhöhte Vulkanaktivitäten zurückgeführt wird. Die Verläufe des Juveniltrends derjenigen subfossilen Eichen, die nach 2650 BC zu wachsen begannen, geben eindeutige Hinweise darauf, dass die damaligen Hartholzauen relativ freie und offene Flächen gewesen sein müssen (Spurk und Leuschner, 1999; Spurk et al., 2002; Land, 2003) und die jungen Eichen durch die geringere Zahl an extremen Hochwassern aufkeimen konnten. Der Verlauf der Hochwassertätigkeit im Maintal zeigt über die untersuchte Periode demnach starke Variabilität in der Flussdynamik – und in der Folge stark variierende Niederschläge im Einzugsgebiet – über viele Jahrhunderte.

Die datierten Frost-Ereignisse ergeben ein ähnliches Muster: In den Perioden um 2800, 2500 und 2250 BC traten vermehrt Frost-Ereignisse in Erscheinung. Hingegen fand sich zwischen 3300 bis 2950 BC kein „Frost-Marker“. In der Periode zwischen 3000 bis 2700

BC – in der auch die „Hochwassser-Marker“ stark in Erscheinung treten – liegen die meisten datierten Frost-Ereignisse. Dass es sich im „4.7k-Event“, und besonders zwischen 2950-2680 BC, um eine Phase mit vermehrten Kälteeinbrüchen im Frühjahr gehandelt haben könnte, wird durch Untersuchungen anderer Autoren gestützt, die für diese Periode Hinweise auf eine maximale Ausdehnungen der Alpengletscher und sehr kühle Sommer-Temperaturen fanden (siehe Publikationen in Starkel, 1995).

Die Datierung und zeitliche Einordnung von extremen Umweltereignissen sind mit anderen Klimarekonstruktionen vergleichbar und zeigen das Potenzial der qualitativen (holzanatomische Anomalien) und quantitativen (Frühholz-Variablen) Holzanatomie auf.

Die vorliegende Arbeit hat deutlich gemacht, dass holzanatomische Veränderungen genutzt werden können, um das Klima der Vergangenheit zu rekonstruieren oder singuläre Umweltereignisse vergangener Zeiten zu datieren. Speziell anhand der HOC Hohenheim könnte dadurch ein Multi-Proxyansatz entstehen, indem – aus ein und demselben Archiv – verschiedene holzanatomische Proxies innerhalb des gleichen Zeitraums Anwendung fänden, um vielfältige Informationen über das Geschehen in der Vergangenheit zu erhalten.

Fazit

Freiland-Experimente sind in dieser Arbeit genutzt worden, um die Ergebnisse einer Rezent-Studie zu verifizieren. Diese Kombination, vereinfachte die Ergebnisfindung wesentlich. Diskontinuierliche holzanatomische Anomalien (z.B. „Frost-Marker“ oder „Hochwasser-Marker“) und kontinuierliche holzanatomische Variablen (z.B. mediane Querschnittsfläche der fünf größten Frühholz-Gefäße) bieten sich als Klimaproxy für die Erforschung der Variabilität des Klimas der Vergangenheit sehr gut an.

Die vorliegende Dissertation hat das Potenzial diesbezüglich deutlich zu Tage gebracht. Aber ebenso deutlich hat sich gezeigt, dass im Anschluss an diese Arbeit weitere Untersuchungen zur Abhängigkeit zwischen Umweltereignissen und Veränderungen in der Holzanatomie erfolgen müssen. Beispielsweise könnten experimentelle Studien bezüglich der Winter-Temperaturen („Winterfröste“) und deren Auswirkung auf die Frühholz-Gefäßgröße durchgeführt werden.

Die Durchsicht des Holzmaterials zur Bestimmung von holzanatomischen Anomalien kann derzeit nur durch zeitintensive Arbeitsleistung erbracht werden; was auch in Zukunft nicht anders möglich sein wird. Dennoch liefert diese Methode wichtige Informationen bezüglich der Klima- und Flussdynamik in vergangenen Zeiten. Der zeitintensiven optischen Durchsicht stehen die quantitativ messbaren „Frühholz-Gefäßgrößen“ (holzanatomische Variablen) gegenüber. Diese erlangten in den letzten Jahren erhöhte Aufmerksamkeit. Neben den „klassischen“ Jahrringbreiten- und Isotopen-Parametern stehen mit ihnen weitere Proxies zur Klimarekonstruktion und Ereignisdatierung zur Verfügung. Über eine Generierung einer Datenbank mit „high-density“ Fotografien präparierter Oberflächen subfossiler Eichen der HOC Hohenheim wird derzeit intensiv diskutiert. Diese große Datenbank könnte von (inter-)nationalen Projekten für Studien genutzt werden. Ein eigenständiges Projekt hierzu ist bereits in Planung.

Die Messung der Querschnittsflächen von Spätholz-Gefäßen ist derzeit noch eine große Herausforderung. Weitere Studien hierzu könnten so manche Überraschung bereithalten.

Die vorliegende Untersuchung hat in aller Deutlichkeit bestätigt, dass Eichen – mit ihren Jährlich/saisonal aufgelösten Jahrringen – ein sehr wichtiges Archiv für die Rekonstruktion des Klimas in der Vergangenheit und der Ereignisdatierung darstellen.

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit Veränderungen in der Holzanatomie von rezenten und subfossilen Eichen, die als Reaktionen auf außerordentlich heftige (extreme) Umweltereignisse ausgebildet worden sind. Untypische Veränderungen hinsichtlich Art bzw. Anzahl und Form bzw. Größe im Querschnitt der Holzzellen, die diskontinuierlich – nicht von Jahr-zu-Jahr auftraten – sowie kontinuierlich auftretende holzanatomische Veränderungen in den Querschnittsflächen der Frühholz-Gefäße (Frühholz-Variablen) – die von Jahr-zu-Jahr auftraten – standen im Fokus. Komplettiert wird die Arbeit durch Studien über „klassische“ Ringbreitenparameter, wie beispielsweise Klima-Wuchsbeziehungen, Weiserjahr-Analysen und Juveniltrend-Studien.

Zur Klärung, welches Umweltereignis (z.B. Hochwasser) welche Art von Veränderung in der Holzanatomie auslöst, ist zum Einen an rezenten Eichen – von klimatisch deutlich unterschiedlicher Standorte – innerhalb Süddeutschlands (Rezent-Studie) und zum Anderen in einem Freiland-Experiment (Botanischer Garten, Universität Hohenheim) unter partiell kontrollierten Bedingungen ermittelt worden (Verifikationsphase). Zum Abschluss der Arbeit wird das Potenzial dieser Studie zur Erforschung des Paläoklimas aufgezeigt, indem die erzielten Ergebnisse herangezogen wurden, um extreme Umweltereignisse innerhalb einer 130-jährigen und einer über 1.000-jährigen Periode im Holozän – auf Basis subfossiler Eichen der HOC Hohenheim (Subfossil-Studie) – zu datieren. Die Häufigkeit der wiederkehrenden Extrem-Ereignisse, in den untersuchten holozänen Perioden, konnte mit der der Rezent-Periode (20. Jahrhundert) verglichen und Rückschlüsse über die Variabilität des Klimas aufgezeigt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit trat sehr deutlich hervor, dass holzanatomische Veränderungen nur dann einem spezifischen Ereignis zugeordnet werden können, wenn die Ausprägung nicht alleinig auf einen Standort begrenzt bleibt, sondern diese in Eichen regional bzw. überregional auftreten.

Belegt werden konnte – durch Studien an rezenten Eichen und durch die Verifikation im Freiland-Experiment –, dass

1. verformte und kollabierte Frühholz-Gefäße in Kombination mit traumatischem Gewebe (Merkmal F/T) ursächlich sehr tiefen Temperaturen zum Zeitpunkt des Blattknospenbruchs zuzuschreiben sind,
2. Dichtebänder – je nach Lage – abrupte Temperaturstürze zu Beginn (Merkmal C) bzw. inmitten (Merkmal D) der Vegetationsperiode signalisieren (Kombination von Merkmal C/N bzw. D/N häufig anzutreffen),
3. langanhaltende Extrem-Hochwasser im Sommer zu stark vergrößerten Spätholz-Gefäßen (Merkmal G) führen,
4. die Querschnittsflächen aller Frühholz-Gefäße durch Hochwasser im Frühjahr – während der Frühholzbildung – einer sehr signifikanten Reduktion (Merkmal SEV) unterliegen,
5. das völlige Ausbleiben der Spätholzbildung (bzw. eine sehr starke Reduktion über mehrere Jahre hintereinander, Merkmal N/N+) durch sehr intensive – meist über Jahre anhaltende – Trockenheit ausgelöst wird,
6. Phasen sehr tiefer Winter-Temperaturen die Querschnittsflächen derjenigen Frühholz-Gefäße sehr stark minimieren, die in der ersten Frühholzreihe liegen (MVA5) und
7. kontinuierliche Jahrring-Proxies (z.B. Spätholzbreite, Gefäßgrößen-Variablen) signifikante Zusammenhänge zu Klimaparametern (z.B. Temperatur, Abfluss) zeigen.

Die Ausprägung der Merkmale bzw. Merkmalskombinationen und deren zugrunde liegende Umweltereignisse von 1., 3. und 4. zeigten, sowohl in der Rezent-Studie als auch in der Verifikationsphase, deutliche Übereinstimmungen; 2., 5. und 6. konnten entweder in der Rezent-Studie oder im Freiland-Experiment mit hoher Wahrscheinlichkeit einem spezifischen Umweltereignis zugeordnet werden – ein experimenteller Beleg muss daher teilweise noch erbracht werden.

Begleitende Messungen des diametralen Stammzuwachses an Eichen (Freiland-Experiment), an denen Frost, Defoliation und Trockenstress simuliert worden waren, zeigten während des Experiments – und in der folgenden Vegetationsperiode – deutliche Unterschiede zur Kontrolle im Stammzuwachs, der Wachstumsdynamik und des Wasserdefizits auf. Die Eichen der Hochwasserversuche verhielten sich gegenüber der Kontrolle

– in dieser Hinsicht – sehr ähnlich. Das Freiland-Experiment zeigte ebenso, wie überflutungstolerant die Eiche (*Quercus robur*) ist: Überflutungsdauern von bis zu zwölf Wochen wurden überstanden.

Zur Ermittlung, inwieweit Umweltereignisse sich auf das Ringbreitenwachstum auf regionaler und überregionaler Ebene auswirkten, wurden Weiserjahr-Analysen durchgeführt. Insbesondere negative Spätholz-Weiserjahre zeigten hohe Übereinstimmung mit extremen Trockenphasen, die charakterisiert waren durch eine mehrmonatige Trockenheit innerhalb eines Jahres oder durch eine mehrjährige Trockenheit.

Eine Ereignisanalyse wurde – basierend auf holzanatomischen Veränderungen in subfossilem Eichenmaterial der HOC Hohenheim – durchgeführt (Subfossil-Studie). Die extremen Umweltereignisse sind in zwei Perioden des Holozäns analysiert worden. Es zeigten sich teils große Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeitsverteilung extremer Umweltereignisse innerhalb der Rezent-Periode (20. Jahrhundert) und den vergangenen Perioden. Während die Anzahl der aufgetretenen sehr tiefen Winter-Temperaturen, in der Periode zwischen 2527-2396 BC, mit der Anzahl im 20. Jahrhundert übereingestimmt haben könnten, lies sich eine „Periode hoher Flussdynamik“ innerhalb des 1.000-jährigen Zeitraums (3279-2201 BC) feststellen. Innerhalb dieser Periode konnten Extrem-Hochwasser ermittelt werden, die in ihrer Anzahl um ein Vielfaches höher gelegen haben müssen, als im vergangenen Jahrhundert.

Summary

This study focuses on changes in wood anatomy of recent (living study), container-grown (verification phase) and subfossil (subfossil study) oaks responding to severe biotic and abiotic events, as well as on “classical” tree-ring analysis (e.g. climate-growth relationships, signature-year analysis and age-trend analysis). Further, non-typical cell formations in wood anatomy with respect to the number, the shape and the size of xylem cells have been investigated. At this juncture, it was distinguished between continuous proxies (year-to-year), like total ring width or earlywood-vessel size, and non-continuous proxies (not year-to-year), like collapsed earlywood vessels or highly enhanced latewood-cell diameters. Measurement of annually resolved cross-section areas of earlywood vessels in recent and subfossil oak trees has been carried out by a specific developed semi-automatic tree ring image-analysis software (TRIAS).

Basic objectives of this study were to connect the affecting biotic or abiotic events to specific changes in wood anatomy. Investigations on living (from locations with different side conditions in southern Germany) and container-grown (in the botanical garden, University of Hohenheim) oaks were performed to validate (verification phase) the results independently between the living and container study, getting clearer insights into the wood anatomical reaction of oaks and the homogeneity of the signal. Finally, the potential of qualitative and quantitative wood-anatomy for palaeo-climatology/-ecology is shown by applying the results to subfossil oaks (Holocene Oak Chronology Hohenheim). An event analysis was performed within two long-lasting periods (130 years and 1.000 years) in the mid-Holocene. Frequency distribution of extreme events, like high-magnitude floods or severe late-frost events, within these two periods in the mid-Holocene was compared with frequencies during the past 100 years.

One result of this study is that one signature wood-anatomical change could be related to an extreme biotic or abiotic event, if the wood-anatomical feature occurred not only on local side level but on regional or national scale. Key evidence could be found for, that

1. out-of-true and collapsed earlywood vessels combined with traumatic tissue (wood-anatomical feature F/T) occurred after very low temperatures at the time of bud break,
2. intra-annual density bands are developed after rapid drops of temperature at an early stage (feature C) of the vegetation period or within (feature D) (depending on the position within the tree ring),
3. a long-lasting summer-flood event results in highly enhanced latewood-cell diameters (feature G),
4. a long-lasting spring-flood event reduces significantly the cross-section area of all vessels within earlywood (feature SEV),
5. latewood formation is absence or highly reduced in years with severe drought periods,
6. rapid drops of temperatures among winter periods (winter frost-events) reduce cross-section areas of initially built earlywood vessels (MVA5) and
7. continuous tree-ring proxies, like total ring width or earlywood-vessel variables, are significantly influenced by different climate factors.

Wood-anatomical features from the recent study for 1., 3. and 4. could also be validated in the verification phase. The link between a biotic or abiotic event and the related specific wood-anatomical feature for 2., 5. and 6. could be found either in the recent study or the verification phase.

Conducted measurements of diametrical stem growth, stem-growth dynamic and water deficit demonstrate big differences between the simulations (drought, frost, water logging, defoliation) that have been carried out on container-grown oaks. The simulations show massive changes in stem-growth dynamics of container-grown oaks affected by drought, frost and defoliation, whereas the waterlogged and control oaks reacted quite similar in their behaviour, and document the good adaptation of pedunculate oak trees to flooding.

Pointer years were calculated and analysed for latewood and earlywood growth at the region Main and upper Rhine. Negative latewood-pointer years show great concurrence to

years of annual summer-drought periods respectively long-lasting perennial droughts.

Extreme events have been dated and analysed within two mid-Holocene periods of 2527-2396 BC (upper Rhine region) and 3279-2201 BC (Main region). High-magnitude floods and winter-frost events were dated using wood-anatomical features in subfossil oak trees (HOC Hohenheim). A “period of high river dynamic” in the Main valley could be analysed around 2750 BC. This result points out that the number of flood events in this period could be much higher than in the twentieth century whereas the number of detected winter-frost events at the upper Rhine region seems not to be increased compared to the past one hundred years.

Literatur

Aas, G. (1989). Untersuchungen zu Trennung und Kreuzbarkeit von Stiel- und Traubeneiche (*Quercus robur* L. und *Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). Dissertation, München.

Alley, W.M. (1984). The Palmer Drought Severity Index: Limitations and Assumptions. Journal of Climate and Applied Meteorology 23: 1100-1109.

Aloni, R. (1982). Role of cytokinin in differentiation of secondary xylem fibers. Plant Physiology 70: 1631-1633.

Aloni, R. (1987). Differentiation of vascular tissues. Annual Reviews of Plant Physiology 38: 179-204.

Astrade, L. and Begin, Y. (1997). Tree-ring response of *Populus tremula* L. and *Quercus robur* L. to recent spring floods of the Saone River, France. Ecoscience 4: 232-239.

Baillie, M.G.L. and Pilcher, J.R. (1973). A simple cross-dating program for tree-ring research. Tree-Ring Bulletin 33: 7-14.

Barbaroux, C. and Breda, N. (2002). Contrasting distribution and seasonal dynamics of carbohydrate reserves in stem wood of adult ring-porous sessile oak and diffuse-porous beech trees. Tree Physiology 22(17): 1201-1210.

Becker, B. und Benckiser, G. (1976). Jahrring- und Wachstumsanalysen zur Klärung des Wuchsstockungsproblems in zwei Fichtenbeständen des Stadtwaldes Villingen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 147: 99-106.

Becker, B. and Schirmer, W. (1977). Palaeoecological study on the Holocene valley development of the River Main, southern Germany. Boreas 4: 303-321.

Becker, B. (1982). Dendrochronologie und Paläoökologie subfossiler Baumstämme aus Flussablagerungen. Ein Beitrag zur nacheiszeitlichen Auenentwicklung im südlichen Mitteleuropa. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

Becker, B. (1983). Postglaziale Auwaldentwicklung im mittleren und oberen Maintal anhand dendrochronologischer Untersuchungen subfossiler Baumstammablagerungen. Geologisches Jahrbuch 71: 45-59.

Becker, B., Kromer, B. and Trimborn, P. (1991). A stable-isotope tree-ring timescale of the Late Glacial/Holocene boundary. Nature 353: 647-649.

Becker, B. (1993). An 11,000-year German oak and pine dendrochronology for radiocarbon calibration. Radiocarbon 35: 201-213.

Bednarz, Z. and Ptak, J. (1990). The influence of temperature and precipitation on ring widths of oak (*Quercus robur* L.) in the Niepolomice forest near Cracow, southern Poland. Tree Ring Bulletin 50: 1-10.

Belien, E. (2008). Spring floods reduce earlywood vessel area of oak (*Quercus robur*). Bachelor-Arbeit, Wageningen.

Billamboz, A. (2002). Die dendrochronologische Heterokonnexion verschiedener Holzarten am Beispiel der metallzeitlichen Pfahlbausiedlungen Südwestdeutschlands. Aussagen aus paläoklimatischer und -ökologischer Sicht. In: Bräuning, A. (Hrsg.) Zum Stand der Anwendung der Dendrochronologie in den Geowissenschaften. Stuttgarter Geographische Studien, Stuttgart. S. 12-32.

Biondi, F. and Waikul, K. (2004). DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. Computers & Geosciences 30: 303-311.

Blanchard, E. (2008). Effect of river discharge on earlywood vessel area of oak (*Quercus robur* L.). Bachelor-Arbeit, Bordeaux.

Blom, C.W.P.M. (1999). Adaptations to flooding stress: From plant community to molecule. Plant Biology 1(3): 261-273.

Bonfils, P., Horisberger, D., und Ulber, M. (2005). Förderung der Eiche. In: W. u. L. B. Bundesanstalt für Umwelt (Hrsg.) Strategie zur Erhaltung eines Natur- und Kulturerbes der Schweiz. proQuercus, Bern. 102 S.

Booth, R.K., Jackson, S.T., Forman, S.L., Kutzbach, J.E., Bettis, E.A., Kreig, J. and Wright, D.K. (2005). A severe centennial-scale drought in mid-continental North America 4200 years ago and apparent global linkages. The Holocene 15(3): 321-328.

Bräker, O.U. (1981). Der Alterstrend bei Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. Mitteilungen der forstlichen Bundesanstalt Wien 142: 75-102.

Bräuning, A. (1999). Zur Dendroklimatologie Hochtibets während des letzten Jahrtausends. Dissertation, Stuttgart-Hohenheim.

Bréda, N., Cochard, H., Dreyer, E. and Granier, A. (1993). Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. Annales des Sciences Forestieres 50: 571-582.

Briffa, K.R. and Jones, P.D. (1990). Basic chronology statistics and assessment. In: Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (Eds.) Methods of dendrochronology. Applications in the environmental science. Kluwer, Dordrecht. S. 137-152.

Briffa, K.R., Schweingruber, F.H., Jones, P.D., Osborn, T.J., Harris, I. C., Shiyatov, S.G., Vaganov, E.A. and Grudd, H. (1998). Trees tell of past climates: but are they speaking less clearly today? Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B 353: 65-73.

Büntgen, U., Brázdil, R., Frank, D. and Esper, J. (2009). Three centuries of Slovakian drought dynamics. Climate Dynamics 35(2): 315-329.

Büntgen, U., Trouet, V., Frank, D., Leuschner, H.H., Friedrichs, D., Luterbacher, J. and Esper, J. (2010). Tree-ring indicators of German summer drought over the last millennium. Quaternary Science Reviews 29(7-8): 1005-1016.

Büsgen, M. und Münch, E. (1927). Bau und Leben unserer Waldbäume. Jena.

Campelo, F., Nabais, C., Gutiérrez, E., Freitas, H. and Garcá-González, I. (2010). Vessel features of *Quercus ilex* L. growing under Mediterranean climate have a better climatic signal than tree-ring width. Trees - Structure and Function 24: 463-470.

Casty, C., Wanner, H., Luterbacher, J., Esper, J. and Böhm, R. (2005). Temperature and precipitation variability in the Eurpean Alps since 1500. International Journal of Climatology 25: 1855-1880.

Cermak, J., Ulehla, J., Kucera, J. and Penka, M. (1982). Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. Biologia Plantarum 24: 446-460.

Charman, D.J. and Hendon, D. (2000). Long-term changes in soil water tables over the past 4500 years: Relationships with climate and north atlantic atmosperic circulation and sea surface temperature. Climatic Change 47: 45-59.

Christensen, K. (1987). Tree rings and insects: the influence of cockchafers on the development of growth rings in oak trees. Proc. Int. Symp. Ecol.: 142-154.

Cochard, H. and Tyree, M.T. (1990). Xylem dysfunction in *Quercus*: vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. Tree Physiology 6: 393-407.

Conner, W.H., McLeod, K.W. and McCarron, J.K. (1998). Survival and growth of seedlings of four bottomland oak species in response to increases in flooding and salinity. Forest Science 44(4): 618-624.

Contran, N., Günthardt-Georg, M.S., Kruster, T.M., Cerana, R., Crosti, P. and Paoletti, E. (2013). Physiological and biochemical responses of *Quercus pubescens* to air warming and drought on acidic and calcareous soils. Plant Biology 15: 157-168.

Cook, E.R. (1985). A time series analysis approach to tree ring standardization. Dissertation, Arizona.

Cook, E.R., D' Arrigo, R.D. and Briffa, K. (1998). A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europe. The Holocene 8(1): 9-17.

Corcuera, L., Camarero, J.J. and Gil-Pelegrin, E. (2004). Effects of a severe drought on growth and wood anatomical properties of *Quercus faginea*. IAWA Journal 25(2): 185-204.

D' Arrigo, R.D., Frank, D., Jacoby, G. and Pederson, N. (2001). Spatial response to major volcanic events in or about AD 536, 934 and 1258: Frost rings and other dendrochronological evidence from Mongolia and Northern Siberia. Climatic Change 49: 239-246.

Douglass, A.E. (1936). Climatic cycles and growth. III. A study of cycles. Carnegie.

Dreyer, E., Colin-Belgrand, M. and Biron, P. (1991). Photosynthesis and shoot water status of seedlings from different oak species submitted to waterlogging. Annales des Sciences Forestieres 48: 205-214.

Eckstein, D. und Schmidt, B. (1974). Dendroklimatologische Untersuchungen an Stieleichen aus dem maritimen Klimagebiet Schleswig-Holsteins. Angewandte Botanik 48: 371-383.

Esper, J., Cook, E.R. and Schweingruber, F.H. (2002). Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science 295: 2250-2253.

Esper, J., Frank, D., Büntgen, U., Verstege, A., Luterbacher, J. and Xoplaki, E. (2007). Long-term drought severity variations in Morocco. Geophysical Research Letters 34(17).

Fischer, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D. and Deck, B. (1999). Ice core redords of atmospheric CO_2 around the last three glacial terminations. Science 12: 1712-1714.

Fletcher, J. M. (1975). Relation of abnormal earlywood in oaks to dendrochronology and climatology. Nature 254(10): 506-507.

Fonti, P. and García-González, I. (2004). Suitability of chestnut earlywood vessel chronologies for ecological studies. New Phytologist 163(1): 77-86.

Fonti, P., Solomonoff, N. and García-González, I. (2007). Earlywood vessels of *Castanea sativa* record temperature before their formation. New Phytologist 173(3): 562-570.

Fonti, P. and García-González, I. (2008). Earlywood vessel size of oak as a potential proxy for spring precipitation in mesic sites. Journal of Biogeography 35: 2249-2257.

Fonti, P., Eilmann, B., García-González, I. and von Arx, G. (2009a). Expeditious building of ring-porous earlywood vessel chronologies without loosing signal information. Trees - Structure and Function23(3): 665-671.

Fonti, P., Treydte, K., Osenstetter, S., Frank, D. and Esper, J.(2009b). Frequency-dependent signals in multi-centennial oak vessel data. Palaeogeography 275: 92-99.

Fonti, P., Heller, O., Cherubini, P., Rigling, A. and Arend, M. (2013). Wood anatomical responses of oak saplings exposed to air warming and soil drought. Plant Biology 15: 210-219.

Fotelli, M.N., Radoglou, K.M. and Constantinidou, H.I.A. (2000). Water stress responses of seedlings of four Mediterranean oak species. Tree Physiology 20(16): 1065-1075.

Friedrich, M., Kromer, B., Spurk, M., Hofmann, J. and Kaiser, K. F. (1999). Palaeo-environment and radiocarbon calibration as derived from Late Glacial/Early Holocene tree-ring chronologies. Quaternary International 61: 27-39.

Friedrich, M., Kromer, B., Kaiser, K.F., Spurk, M., Hughen, K.A. and Johnson, S.J. (2001). High-resolution climate signals in the Boelling/Allerod Interstadial (Greenland Interstadial 1) as reflected in European tree-ring chronologies compared to marine varves and ice-core records. Quaternary Science Reviews 20: 1223-1232.

Friedrich, M., Remmele, S., Kromer, B., Spurk, M., Hofmann, J., Hurni, J.P., Kaiser, K.F. and Küppers, M. (2004). The 12.480-year Hohenheim oak and pine tree-ring chronology from Central Europe- a unique annual record for radiocarbon calibration and palaeoenvironment reconstructions. Radiocarbon 46: 1111-1122.

Friedrich, W.L., Kromer, B., Friedrich, M., Heinemeier, J., Pfeiffer, T. and Talamo, S. (2006). Santorini eruption radiocarbon dated to 1627-1600 B.C. Science 312: 548.

Friedrichs, D.A., Büntgen, U., Frank, D.C., Esper, J., Neuwirth, B. and Löffler, J. (2009a). Complex climate controls on 20th century oak growth in Central-West Germany. Tree Physiology 29: 39-51.

Friedrichs, D.A., Neuwirth, B., Winiger, M. and Löffler, J. (2009b). Methodologically induced differences in oak site classifications in a homogeneous tree-ring network. Dendrochronologia 27: 21-30.

Fritts, H.C. (1976). Tree rings and climate. Academic Press, London.

Fritts, H.C. (1991). Reconstructing large scale climatic patterns from tree-ring data: a diagnostic analysis. Universitiy of Arizona Press, Tucson.

Fürst, O. (1963). Vergleichende Untersuchungen über räumliche und zeitliche Unterschiede interannueller Jahrringbreitenschwankungen und ihre klimatologische Auswertung. Flora 153: 469-508.

García-González, I. (2001). Weiser: a computer program to identify event and pointer years in dendrochronological series. Dendrochronologia 19: 239-244.

García-González, I. and Eckstein, D. (2003). Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. Tree Physiology 23(7): 497-504.

García-González, I. (2008). Comparison of different distance measurement for cluster analysis of tree-ring series. Tree-Ring Research 64(1): 27-37.

Garfi, G. (2000). Climatic signal in tree-rings of *Quercus pubescens* and *Celtis australis* in Southeastern Sicily. Dendrochronologia 18: 41-51.

Gea-Izquierdo, G., Fonti, P., Cherubini, P., Martin-Benito, D., Chaar, H. and Canellas, I. (2012). Xylem hydraulic adjustment and growth response of Quercus canariensis Willd. to climatic variability. Tree Physiology 32: 401-413.

Gieger, T. and Thomas, F.M. (2002). Effects of defoliation and drought stress on biomass partitioning and water relations of *Quercus robur* and *Quercus petraea*. Basic and Applied Ecology 3: 171-181.

Glaser, R., Riemann, D., Schönbein, J., Barriendos, M., Brázdil, R., Bertolin, C., Camuffo, D., Deutsch, M., Dobrovolny, P., van Engelen, A., Enzi, S., Halickova, M., Koenig, S.J., Kotyza, O., Limanowka, D., Macková, J., Sghedoni, M., Martin, B. and Himmelsbach, I. (2010). The variability of European floods since AD 1500. Climatic Change 101(1): 235-256.

Gomes, S.A.R. and Kozlowski, T.T. (1980). Growth responses and adaptations of *Fraxinus pennsylvanica* seedlings to flooding. Plant Physiology 66: 267-271.

González-González, B.D., Garcia-Gonzalez, I. and Vázquez-Ruiz, R.A. (2013). Comparative cambial dynamics and phenology of *Quercus robur* L. and *Q. pyrenaica* Willd. in an Atlantic forest of the northwestern Iberian Peninsula. Trees - Structure and Function DOI 10.1007/s00468-013-0905-x.

Gottesfeld, A.S. (1996). British Columbia flood scars: maximum flood-stage indicators. Geomorphology 14: 319-325.

Granier, A., Anfodillo, T., Sabatti, M., Cochard, H., Dreyer, E., Tomasi, M., Valentini, R. and Breda, N. (1994). Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. Tree Physiology 14(12): 1383-1396.

Haneca, K., Van Acker, J. and Beeckman, H. (2005). Growth trends reveal the forest structure during Roman and Medieval times in Western Europe: a comparison between archaeological and actual oak ring series (*Quercus robur* and *Quercus petraea*). Annals of Forest Science 62: 797-805.

Haneca, K., Boeren, I., Van Acker, J. and Beeckman, H. (2006). Dendrochronology in suboptimal conditions: tree rings from medieval oak from Flanders (Belgium) as dating tools and archives of past forest management. Vegetation History and Archaeobotany 15: 137-144.

Hansen, J. (2003). Diagnostischer Wert von Radialzuwachs und Zellstrukturen der Stieleiche (*Quercus robur* L.) für Umwelteinflüsse. Dissertation, Freiburg.

Häsler, R. (1988). Physiologische Wirkung des Frostes auf Pflanzen. Berichte der Eidgenössischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen 307: 45-48.

Hauser, S. (1998). Identifizierung und Beschreibung von Anomalien im Holz von Eichen. Diplomarbeit, Stuttgart-Hohenheim.

Henning-Müller, I. (2004-2006). Meteorologische Monatsberichte. Institut für Physik und Meteorologie der Universität Hohenheim, Stuttgart-Hohenheim.

Hitz, O.M., Gärtner, H., Heinrich, I. and Monbaron, M. (2008). Application of ash (*Fraxinus excelsior* L.) roots to determine erosion rates in mountain torrents. Catena 72: 248-258.

Huber, B. (1952). Beiträge zur Methodik der Jahrringchronologie. Gegenläufigkeitsprozent und Gegenläufigkeitsstruktur als Maßstäbe bei der Sicherung jahrringchronologischer Datierungen. Holzforschung 6: 33-37.

Jones, P.D., Briffa, K.R., Osborn, T.J., Lough, T.M., van Ommen, T.D., Vinther, B.M., Luterbacher, J., Wahl, E.R., Zwiers, F.W., Mann, M.E., Schmidt, G.A., Ammann, C.M., Buckley, B.M., Cobb, K.M., Esper, J., Goosse, H., Graham, N., Jansen, E., Kiefer, T., Kull, C., Küttel, M., Mosley-Thompson, E., Overpeck, J.T., Riedwyl, N., Schulz, M., Tudhope, A.W., Villalba, R., Wanner, H., Wolff, E. and Xoplaki, E. (2009). High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: a review of current status and future prospects. The Holocene 19(1): 3-49.

Khasanov, B. F. (2012). Severe winter rings of oak trees (*Quercus robur* L.) from Central European Russia. International Journal of Biometeorology DOI 10.1007/s00484-012-0611-1.

Knapp, P.A., Grissino-Mayer, H.D. and Soulé, P.T. (2002). Climatic regionalization and spatio-temporal occurence of extreme single-year drought events (1500-1998) in the Interior Pacific Northwest, USA. Quaternary Research 58: 226-233.

Krahl-Urban, J. (1959). Die Eichen. Verlag für Landwirtschaft, Veterinärmedizin, Gartenbau, Forst- und Jagdwesen, Hamburg.

Kreye, A. (2008). Gasaustausch und Dickenwachstum von *Quercus robur* und *Qercus petraea*: Einfluss von Überflutung. Bachelor-Arbeit, Bayreuth.

Laible, V. (1987). Der Einfluß des Standortes auf den Zuwachsverlauf (Jahrringbreiten) südwestdeutscher Eichenbestände. Diplomarbeit, Stuttgart-Hohenheim.

LaMarche jr., V.C. and Hirschboeck, K.K. (1984). Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. Nature 307: 121-126.

Land, A. (2003). Über den Einfluß von Klima und Standort auf den Früh- und Spätholz-Zuwachs rezenter Eichen. Diplomarbeit, Stuttgart-Hohenheim.

Larson, P.R. (1994). The vascular cambium. - Development and structure. Springer Verlag.

Leuschner, H.H. und Schweingruber, F.H. (1996). Dendroökologische Klassifizierung und Auswertung häufig auftretender intraanueller holzanatomischer Merkmale bei Eichen und Kiefern. Dendrochronologia 14: 273-285.

Loris, K. (1995). Möglichkeiten der Permanentzuwachsmessung und ihre Aussagekraft. Forstliche Forschungsberichte München 153: 1-15.

Lovisolo, C. and Schubert, A. (1998). Effects of water stress on vessel size and xylem hydraulic conductivity in *Vitis vinifera* L. Journal of Experimental Botany 49(321): 693-700.

Luterbacher, J., Dietrich, D., Xoplaki, E., Grosjean, M. and Wanner, H. (2004). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. Science 303(5): 1499-1503.

Mann, M.E., Bradley, R.S. and Hughes, M.K. (1998). Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. Nature 392(6678): 779-787.

Mann, M. E. and Jones, P.D. (2003). Global surface temperature over the past two millennia. Geophysical Research Letters 30(15): 1-4.

Mann, M.E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R.S., Hughes, M.K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G. and Ni, F. (2009). Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. Science 326(27): 1256-1260.

Masiokas, M. and Villalba, R. (2004). Climatic significance of intra-annual bands in the wood of *Nothofagus pumilio* in southern Patagonia. Trees - Structure and Function 18: 696-704.

Matisons, R. and Brümelis, G. (2012a). Influence of climate on tree-ring and earlywood vessel formation in *Quercus robur* in Latvia. Trees - Structure and Function 26: 1251-1266.

Matisons, R., Elferts, D. and Brümelis, G. (2012b). Changes in climatic signals of English oak tree-ring width and cross-section area of earlywood vessels in Latvia during the period 1900-2009. Forest Ecology and Management 279: 34-44.

Matisons, R., Elferts, D. and Brümelis, G. (2013). Pointer years in tree-ring width and earlywood-vessel area time series of *Quercus robur* - Relation with climate factors near its northern distribution limit. Dendrochronologia 31: 129-139.

Mayr, C., Frenzel, B., Friedrich, M., Spurk, M., Stichler, W. and Trimborn, P. (2003). Stable carbon- and hydrogen-isotope ratios of subfossil oaks in southern Germany: methodology and application to a composite record for the Holocene. The Holocene 13: 393-402.

Michaelsen, J. (1989). Long-period fluctuations in El Nino amplitude and frequency reconstructed from tree-rings. In: Peterson, D.H. (Ed.) Aspects of climate variability in the Pacific and the Wester. American Geophysical Union, Washington DC. pp. 69-74.

Mork, E. (1928). Die Qualität des Fichtenholzes unter besonderer Rücksichtnahme auf Schleif- und Papierholz. Papier Fabrikant 23: 741-747.

Naughton, F., Bourillet, J.-F., Fernanda, M., Goni, S., Turon, J.-L. and Jouanneau, J.-M. (2007). Long-term and millennial-scale climate variability in northwestern France during the last 8850 years. The Holocene 17(7): 939-953.

Neuwirth, B., Schweingruber, F.H. and Winiger, M. (2007). Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. Dendrochronologia 24: 79-89.

Nola, P. (1996). Climatic signal in earlywood and latewood of deciduous oaks from northern Italy. In: Dean, L.S., Meko, D.M., Swetnam, T.W. (Eds.) Tree rings, environment, and humanity. Proceedings of the International Conference, Tucson, Arizona. pp. 249-258.

Oracle (2000). OpenOffice.org.

Orcel, A., Orcel, Chr., Alain, F., Mohnhaupt, M. and Hurni, J.-P. (1993). Dendroclimatic model constructed with oakwoods of the Swiss Piemont jurassian. Tree rings and environment 34: 247-253.

Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. Research Paper 45. U.S. Dept. of Commerce, Washington, D.C.

Parelle, J., Brendel, O., Bodénès, C., Berveiller, D., Dizengremel, P. and Dreyer, E. (2006). Differences in morphological and physiological responses to water-logging between two sympatric oak species (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl., *Quercus robur* L.). Annales des Sciences Forestieres 63: 849-859.

Patzelt, G. (1977). Der zeitliche Ablauf und das Ausmass postglazialer Klimaschwankungen in den Alpen. Erdwissenschaftliche Forschung 13: 249-259.

Phipps, R.L. (1983). Streamflow of the Occoquan River in Virginia as reconstructed from tree-rings series. Water Recources Bulletin 19: 735-743.

Pilcher, J.R. and Gray, B. (1982). The relationship between oak tree growth and climate in Britain. Journal of Ecology 70: 297-304.

Pisek, J. and Brázdil, R. (2006). Responses of large volcanic eruptions in the instrumental and documentary climatic data over Central Europe. International Journal of Climatology 26(4): 439-459.

Pumijumnong, N. and Park, W.-K. (1999). Vessel chronologies from teak in northern Thailand and their climatic signal. IAWA Journal 20(3): 285-294.

Rasmussen, S.O., Andersen, K.K., Svensson, A.M., Steffensen, J.P., Vinther, B.M., Clausen, H.B., Siggaard-Andersen, M.-L., Johnsen, S.J., Larsen, L.B., Dahl-Jensen, D., Bigler, M., Röthlisberger, R., Fischer, H., Goto-Azuma, K., Hansson, M.E. and Ruth, U. (2006). A new Greenland ice core chronology for the last glacial termination. Journal of Geophysical Research D: Atmospheres 111(6).

Rieth, U. (1975). Untersuchungen über das Jahrringverhalten der Eiche in verschiedenen Auenwaldstandorten der Donau. Diplomarbeit, Stuttgart-Hohenheim.

Rinn, F. (1989-1996). TSAP - Time Series Analysis and Presentation, Heidelberg.

Rossi, S., Deslauriers, A., Anfodillo, T. and Carraro, V. (2007). Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. Oecologia 152: 1-12.

Rozas, V. (2001). Detecting the impact of climate and disturbances on tree-ring of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Norhtern Spain. Annales des Sciences Forestieres 58: 237-251.

Rozas, V. (2005). Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. Annales des Sciences Forestieres 62: 209-218.

Sass, U. and Eckstein, D. (1995). The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation. Trees - Structure and Function 9: 247-252.

Sass-Klaassen, U., Vernimmen, T. and Baittinger, C. (2008). Dendrochronological dating and provenancing of timber used as foundation piles under historic buildings in The Netherlands. International Biodeterioration and Biodegradation 61: 96-105.

Schenk, W. (1993). Eichelmastdaten aus 350 Jahren für Mainfranken - Probleme der Erfassung und Ansätze für umweltgeschichtliche Interpretationen. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 165: 122-132.

Schmull, M. and Thomas, F.M. (2000). Morphological and physiological reactions of young deciduous trees (*Quercus robur* L., *Q. petraea* [Matt.] Liebl., *Fagus sylvatica* L.) to waterlogging. Plant and Soil 225: 227-242.

Schönbein, J. (2011). Zur Rekonstruktion von Hochwasserereignissen in Europa aus holzanatomischen Parametern und historischen Quellen. Dissertation, Freiburg.

Schönwiese, C.D. (1985). Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart.

Schrader, J., Moyle, R., Bhalerao, R., Hertzberg, M., Lundeberg, J., Nilsson, P. and Bhalerao, R.P. (2004). Cambial meristem dormancy in trees involves extensive remodelling of the transcriptome. The Plant Journal 40: 173-187.

Schultz, J.A. and Neuwirth, B. (2012). A new atmospheric circulation tree-ring index (ACTI) derived from climate proxies: Procedure, results and applications. Agricultural and Forest Meteorology 164: 149-160.

Schweingruber, F.H., Eckstein, D., Serre-Bachet, F. and Bräker, O.U. (1990). Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. Dendrochronologia 8: 9-38.

Schweingruber, F.H., Wehrli, U., Aellen-Rumo, K. und Aellen, M. (1991). Weiserjahre als Zeiger extremer Standortseinflüsse. Schweizerische Zeitschrift für das Forstwesen 142(1): 33-52.

Schweingruber, F.H. and Briffa, K.R. (1996). Tree-ring density networks for climate reconstruction. In: Jones, P.D., Bradley, R.S., Jouzel, J. (Eds.) Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 years. NATO ASI Series 141: 43-66.

Schweingruber, F.H. (2001). Dendroökologische Holzanatomie: Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Bern Stuttgart Wien, Verlag Paul Haupt.

Siebel, H.N., Van Wijk, M. and Blom, C.W.P.M. (1998). Can tree seedlings survive increased flood levels of rivers? Acta Botanica Neerlandica 47(2): 219-230.

Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B. ,Schüssler, M. and Beer, J. (2004). Unusual activity of the sun during recent decades compared to the previous 11,000 years. Nature 431(28): 1084-1087.

Späth, V. (1999). Untersuchungen zur Hochwasserdynamik und zur standortskundlichen Einstufung im Forstbezirk Rastatt, Ötigheim.

Späth, V. (2002). Hochwassertoleranz von Waldbäumen in der Rheinaue. AFZ, der Wald 15: 807-810.

Spurk, M., Friedrich, M., Hofmann, J., Remmele, S., Frenzel, B., Leuschner, H.H., and Kromer, B. (1998). Revisions and extensions of the Hohenheimer oak and pine chronologies- new evidence about the timing of the Younger Dryas/Preboreal-Transition. Radiocarbon 40: 1107-1116.

Spurk, M. and Leuschner, H.H. (1999). Reasons for changing fluvial dynamics in the past- men or climate. In: Böcker, R. (Hrsg.) Hohenheimer Umwelttagung. Verlag Günter Heimbach, Stuttgart-Hohenheim. S. 99-106.

Spurk, M., Leuschner, H.H., Baillie, M.G.L., Briffa, K.R. and Friedrich, M. (2002). Depositional frequency of German subfossil oaks: climatically and non-climatically induced fluctuations in the Holocene. The Holocene 12(6): 707-715.

Starkel, L. (1995). Reconstruction of hydrological changes between 7000 and 3000 BP in the upper and middle Vistula River Basin, Poland. Holocene 5(1): 34-42

Steppe, K. and Lemeur, R. (2007). Effects of ring-porous and diffuse-porous stem wood anatomy on the hydraulic parameters used in a water flow and storage model. Tree Physiology 27: 43-52.

St. George, S. and Nielsen, E. (2000). Signatures of high-magnitude 19th-century floods in *Quercus macrocarpa* tree rings along the Red River, Manitoba, Canada. Geology 28: 899-902.

St George, S. and Nielsen, E. (2002). Hydroclimatic change in southern Manitoba since A.D. 1409 inferred from tree rings. Quaternary Research 58: 103-111.

St. George, S. and Nielsen, E. (2003). Palaeoflood records for the Red River, Manitoba, Canada, derived from anatomical tree-ring signatures. Holocene 13(4): 547-555.

St. George, S., Outridge, P.M. and Nielsen, E. (2006). High-resolution dendrochemical analysis of flood affected oaks using laser ablation ICP-Mass spectrometry. IAWA Journal 27(1): 19-31.

Suzuki, M., Yoda, K. and Suzuki, H. (1996). Phenological comparison of the onset of vessel formation between ring-porous and diffuse-porous deciduous trees in a Japanese temperate forest. IAWA Journal 17(4): 431-444.

Tang, Z.C. and Kozlowski, T.T. (1982). Some physiological and morphological responses of *Quercus macrocarpa* seedlings to flooding. Canadian Journal of Forest Research 12(2): 196-202.

Tapper, M., Fletcher, J.M. and Walker, F. (1978). Abnormal small earlywood vessels in oak. Their use as chronological indicators and their relation to arrested heartwood formation (included sapwood) after certain cold winters. B.A.R. International Series 51: 339-342.

Tardif, J. and Bergeron, Y. (1997). Ice-flood history reconstructed with tree-rings from the southern boreal forest limit, western Quebec. The Holocene 7(3): 291-300.

Tessier, L. (1989). Spatio- temporal analysis of climate-tree ring relationships. New Phytologist 111: 517-529.

Thomas, F.M. and Gausling, T. (2000). Morphological and physiological responses of oak seedlings (*Quercus petraea* and *Q. robur*) to moderate drought. Annals of Forest Science 57: 325-333.

Touchan, R., Akkemik, Ü, Hughes, M.K. and Erkan, N. (2007). May-June precipitation reconstruction of southwestern Anatolia, Turkey during the last 900 years from tree rings. Quaternary Research 68: 196-202.

Trouet, V., Esper, J., Graham, N., Baker, A., Scourse, J.D. and Frank, D.C. (2009). Persistant positive North Atlantic Oscillation mode dominated the Medieval Climate Anomaly. Science 324: 78-80.

Tyree, M.T. and Cochard, H. (1996). Summer and winter embolism in oak: Impact on water relations. Annales des Sciences Forestieres 53(2-3): 173-18.

Unbehauen, W. (1971). Die Hochwasserabflußverhältnisse der Bayerischen Donau - Hochwasser der Jahresreihen 1845/1965. Bayerische Landesstelle für Gewässerkunde, München.

Utsumi, Y., Sano, Y., Funada, R., Fujikawa, S. and Ohtani, J. (1999). The progression of cavitation in earlywood vessels of *Fraxinus mandshurica* var. *japonica* during freezing and thawing. Plant Physiology 121(3): 897-904.

van der Schrier, G., Briffa, K.R., Jones, P.D. and Osborn, T.J. (2006). Summer moisture variability across Europe. Journal of Climate 19(12): 2818-2834.

van der Werf, G.W., Sass-Klaassen, U.G.W. and Mohren, G.M.J. (2007). The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. Dendrochronologia 25: 103-112.

Wigley, T.M. L., Briffa, K.R. and Jones, P.D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. American Meteorology Society 23: 201-213.

Wilcox, D., Dove, B., McDavid, D. and Greer, D. (1995-2002). UTHSCSA ImageTool. The University of Texas Health Science Center, San Antonio.

Wilson, R.J.S., Luckman, B.H. and Esper, J. (2005). A 500 year dendroclimatic reconstruction of spring-summer precipitation from the Lower Bavarian forest region, Germany. International Journal of Climatology 25: 611-630.

Wimmer, R. (2002). Wood anatomical features in tree-rings as indicators for environmental changes. Dendrochronologia 20(1/2): 21-36.

Woodcock, D.W. (1989). Climate sensitivity of wood-anatomical features in a ring-porous oak (*Quercus macrocarpa*). Canadian Journal of Forest Research 19: 639-644.

Yamamoto, F. and Kozlowski, T.T. (1987). Effect of flooding, tilting of stems, and ethrel application on growth, stem anatomy, and ethylene production of *Acer platanoides* seedlings. Scandinavian Journal of Forest Research 2: 141-156.

Yanosky, T.M. (1983). Evidence of floods on the Potomac River from anatomical abnormalities in the wood of flood-plains trees. U.S. Geological Survey Professional Paper 1296: 1-142.

Yanosky, T.M. and Jarret, R.D. (2002). Dendrochronological evidence for the frequency and magnitude of palaeofloods. In: House, P.K., Levish, D.R., Webb, R.H., Baker, V.R. (Eds.) Palaeoflood Hydrology. American Geophysical Union Monograph, Washington. pp. 77-89.

Zakrzewski, J. (1991). Effect of indole-3-acetic acid (IAA) and sucrose on vessel size and density in isolated stem segments of oak (*Quercus robur*). Physiologia Plantarum 81: 234-238.

Zasada, J.C. and Zahner, R. (1969). Vessel element development in the earlywood of red oak (*Quercus rubra*). Canadian Journal of Botany 47: 1965-1971.

Zielonka, T., Holeska, J. and Ciapala, S. (2008). A reconstruction of flood events using scarred trees in the Tatra Mountains, Poland. Dendrochronologia 26: 173-183.

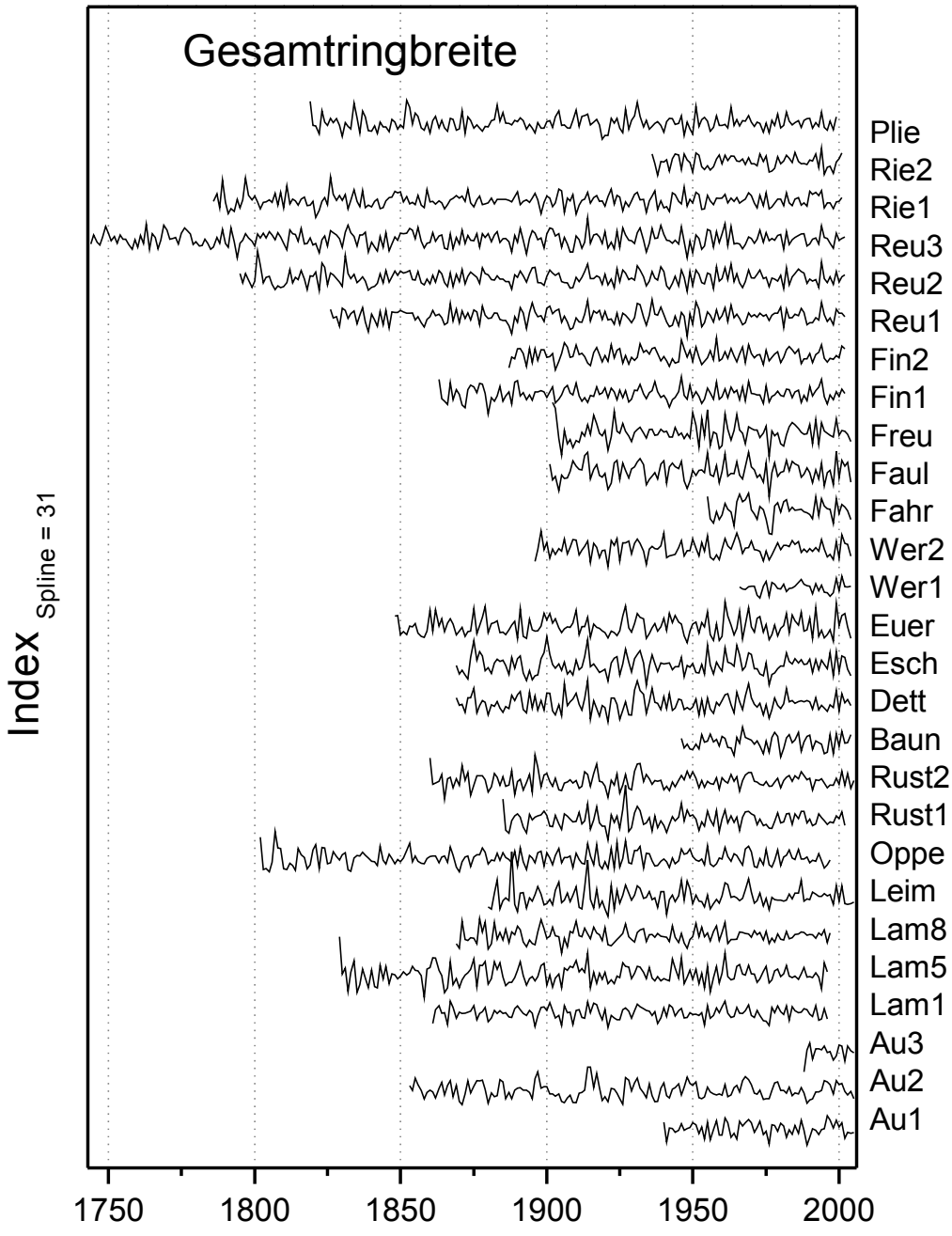
Zimmermann, M.H. and Brown, C.L. (1971). Trees - Structure and Function. Berlin, Springer-Verlag.

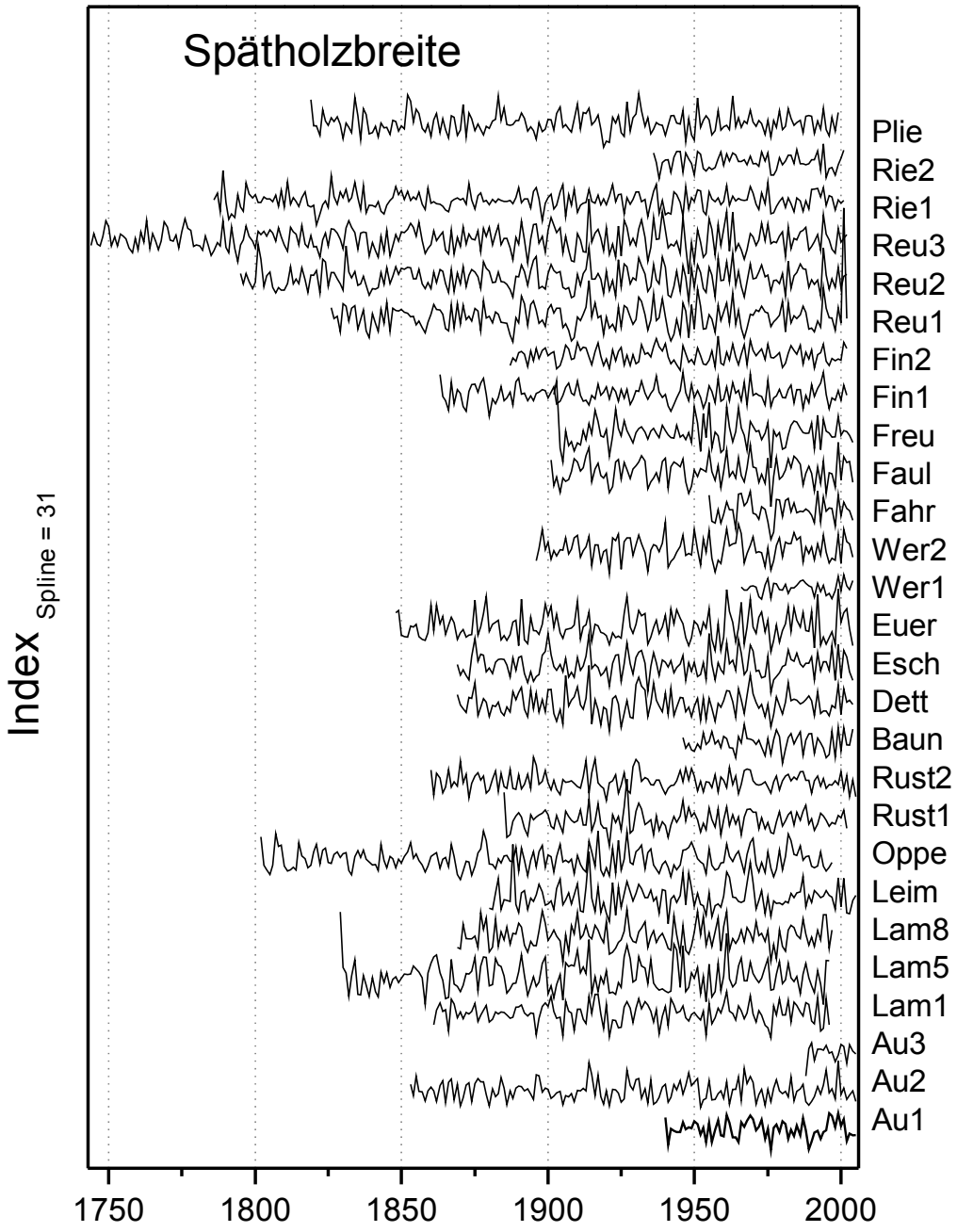
Anhang

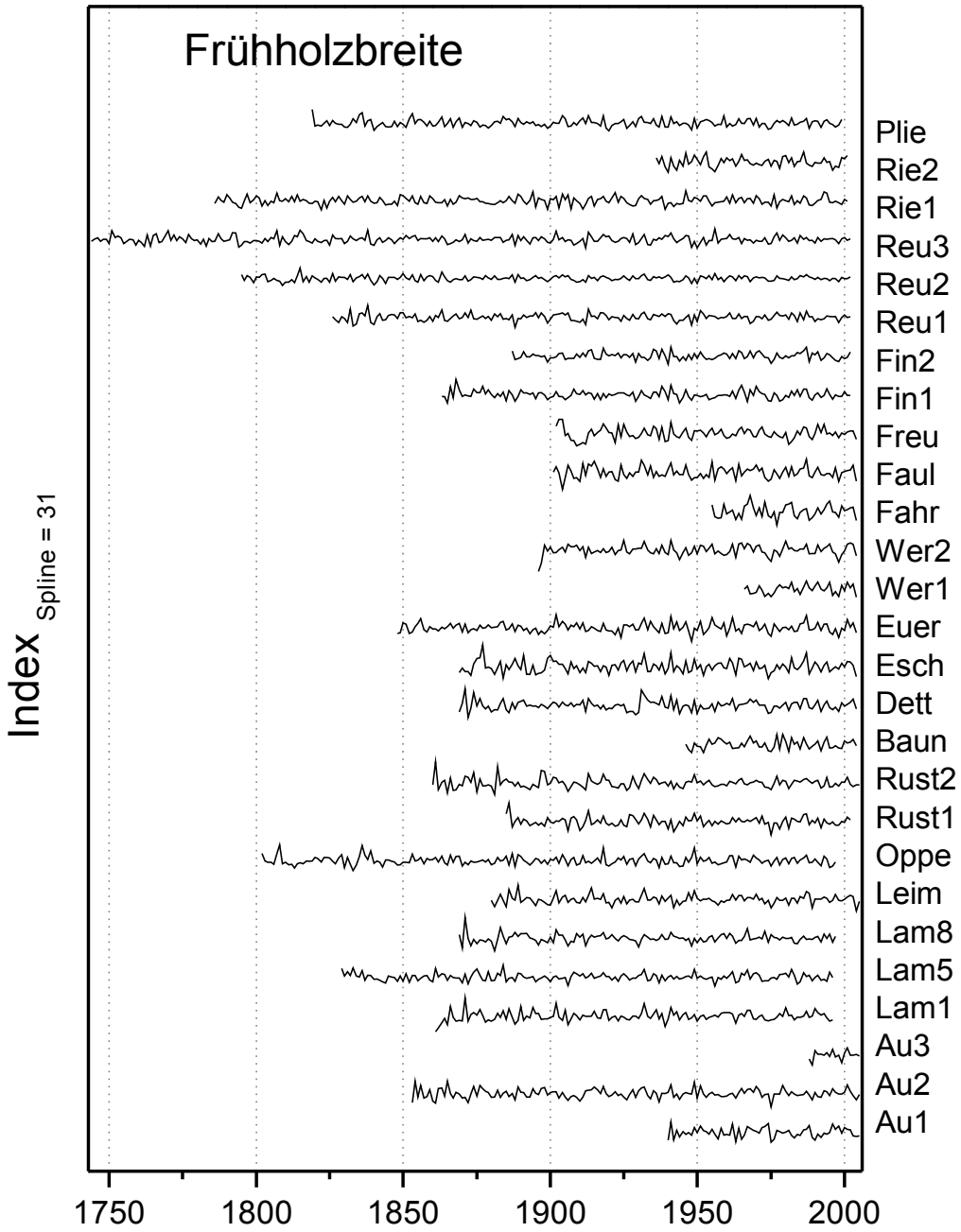
Im Anschluss sind hier Daten, Abbildungen und Tabellen aufgeführt, die im vorherigen Teil der Arbeit keinen Platz fanden, nicht weil sie nicht wichtig gewesen wären oder nicht dazu beigetragen hätten Ergebnisse ans Tageslicht zu bringen, sondern weil es an so mancher Stelle die Arbeit überladen hätten. Für tiefgreifende Einblicke in die Arbeit könnten diese für andere WissenschaftlerInnen von Interesse sein...

Erläuterungen der Symbole bzw. Abkürzungen finden sich im Abkürzungsverzeichnis (Seite 9). Eine Standortsliste mit den Standortskürzeln ist Tab. 2-2 auf Seite 9 zu entnehmen.

Chronologien von Gesamtring-, Spätholz- und Frühholzbreite




Spätholzbreite
Index Spline = 31
Plie
Rie2
Rie1
Reu3
Reu2
Reu1
Fin2
Fin1
Freu
Faul
Fahr
Wer2
Wer1
Euer
Esch
Dett
Baun
Rust2
Rust1
Oppe
Leim
Lam8
Lam5
Lam1
Au3
Au2
Au1
1750
1800
1850
1900
1950
2000


Frühholzbreite
Index Spline = 31
Plie
Rie2
Rie1
Reu3
Reu2
Reu1
Fin2
Fin1
Freu
Faul
Fahr
Wer2
Wer1
Euer
Esch
Dett
Baun
Rust2
Rust1
Oppe
Leim
Lam8
Lam5
Lam1
Au3
Au2
Au1
1750
1800
1850
1900
1950
2000

Liste aller Einzelbäume mit baumrelevanten Angaben der Rezent-Studie

Nr.	Key-Code	Standort		P	SWR	WK?	Alter	Beginn	Ende	J. bis Mark	Alter (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	FING0001	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	-	17	WKL	108	1895	2002	5	113	1890
2	FING0002	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	12	WKL	95	1908	2002	2	97	1906
3	FING0003	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	13	WKL	88	1915	2002	6	94	1909
4	FING0004	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	26	WKL	119	1884	2002	1	120	1883
5	FING0005	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	M	10	WKL	89	1914	2002	0	89	1914
6	FING0006	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	17	WKL	104	1899	2002	12	116	1887
7	FING0007	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	17	WKL	134	1869	2002	2	136	1867
8	FING0008	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	-	13	WKL	116	1887	2002	12	128	1875
9	FING0009	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	17	WKL	140	1863	2002	5	145	1858
10	FING0010	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	-	16	WKL	102	1901	2002	2	104	1899
11	FING0011	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	10	WKL	109	1894	2002	5	114	1889
12	FING0012	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	-	11	WKL	95	1908	2002	14	109	1894
13	FING0013	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	M	14	WKL	121	1882	2002	0	121	1882
14	FING0014	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	M	19	WKL	120	1883	2002	0	120	1883
15	FING0015	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	M	13	WKL	125	1878	2002	0	125	1878
16	FING0016	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	13	WKL	116	1887	2002	2	118	1885
17	FING0017	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	20	WKL	112	1891	2002	4	116	1887
18	FING0018	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	13	WKL	113	1890	2002	1	114	1889
19	FING0019	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	16	WKL	110	1893	2002	4	114	1889
20	FING0020	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	16	WKL	108	1895	2002	3	111	1892
21	FING0021	GUNDREMMINGEN	Fingadowald	n	14	WKL	112	1891	2002	1	113	1890

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	RUST0001	RUST	Taubergießen	n	14	WKL	109	1894	2002	3	112	1891
2	RUST0002	RUST	Taubergießen	n	11	WKL	70	1933	2002	12	82	1921
3	RUST0003	RUST	Taubergießen	M	14	WKL	102	1901	2002	0	102	1901
4	RUST0004	RUST	Taubergießen	n	11	WKL	90	1913	2002	8	98	1905
5	RUST0005	RUST	Taubergießen	n	15	WKL	103	1900	2002	3	106	1897
6	RUST0006	RUST	Taubergießen	M	11	WKL	113	1890	2002	0	113	1890
7	RUST0007	RUST	Taubergießen	n	12	WKL	66	1937	2002	3	69	1934
8	RUST0008	RUST	Taubergießen	-	10	WKL	74	1929	2002	10	84	1919
9	RUST0009	RUST	Taubergießen	n	14	WKL	111	1892	2002	3	114	1889
10	RUST0010	RUST	Taubergießen	M	19	WKL	115	1888	2002	0	115	1888
11	RUST0011	RUST	Taubergießen	M	14	WKL	91	1912	2002	0	91	1912
12	RUST0013	RUST	Taubergießen	-	14	WKL	91	1912	2002	8	99	1904
13	RUST0014	RUST	Taubergießen	n	16	WKL	113	1889	2002	3	116	1886

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	REUT0001	REUTLINGEN	Urselberg	M	-	-	171	1831	2001	0	171	1831
2	REUT0002	REUTLINGEN	Urselberg	n	14	WKL	153	1850	2002	3	156	1847
3	REUT0003	REUTLINGEN	Urselberg	n	17	WKL	143	1860	2002	11	154	1849
4	REUT0004	REUTLINGEN	Urselberg	n	16	WKL	174	1829	2002	3	177	1826
5	REUT0005	REUTLINGEN	Urselberg	M	17	WKL	160	1843	2002	0	160	1843
6	REUT0006	REUTLINGEN	Urselberg	n	20	WKL	169	1834	2002	3	172	1831
7	REUT0007	REUTLINGEN	Urselberg	M	14	WKL	171	1832	2002	0	171	1832
8	REUT0008	REUTLINGEN	Urselberg	n	18	WKL	160	1843	2002	3	163	1840
9	REUT0009	REUTLINGEN	Urselberg	M	17	WKL	172	1831	2002	0	172	1831
10	REUT0010	REUTLINGEN	Urselberg	n	15	WKL	177	1826	2002	2	179	1824
11	REUT0011	REUTLINGEN	Urselberg	M	18	WKL	173	1830	2002	0	173	1830
12	REUT0012	REUTLINGEN	Urselberg	n	30	WKL	191	1812	2002	2	193	1810
13	REUT0013	REUTLINGEN	Urselberg	n	15	WKL	178	1825	2002	4	182	1821
14	REUT0014	REUTLINGEN	Urselberg	n	18	WKL	157	1846	2002	8	165	1838
15	REUT0015	REUTLINGEN	Urselberg	n	30	WKL	190	1813	2002	2	192	1811

16	REUT0016	REUTLINGEN	Urselberg	n	21	WKL	208	1795	2002	12	220	1783
17	REUT0017	REUTLINGEN	Urselberg	n	25	WKL	208	1795	2002	2	210	1793
18	REUT0018	REUTLINGEN	Urselberg	M	29	WKL	168	1835	2002	0	168	1835
19	REUT0019	REUTLINGEN	Urselberg	n	34	WKL	192	1811	2002	5	197	1806
20	REUT0020	REUTLINGEN	Urselberg	n	23	WKL	186	1817	2002	10	196	1807
21	REUT0021	REUTLINGEN	Urselberg	n	22	WKL	191	1812	2002	8	199	1804
22	REUT0022	REUTLINGEN	Urselberg	n	16	WKL	190	1813	2002	0	190	1813
23	REUT0023	REUTLINGEN	Urselberg	n	-	-	172	1829	2000	18	190	1811
24	REUT0024	REUTLINGEN	Urselberg	n	23	WKL	166	1837	2002	4	170	1833
25	REUT0025	REUTLINGEN	Urselberg	M	33	WKL	185	1818	2002	0	185	1818
26	REUT0026	REUTLINGEN	Urselberg	M	28	WKL	197	1806	2002	0	197	1806
27	REUT0027	REUTLINGEN	Urselberg	-	34	WKL	141	1862	2002	45	186	1817
28	REUT0028	REUTLINGEN	Urselberg	-	16	WKL	174	1829	2002	10	184	1819
29	REUT0029	REUTLINGEN	Urselberg	n	19	WKL	177	1826	2002	5	182	1821
30	REUT0030	REUTLINGEN	Urselberg	M	29	WKL	170	1833	2002	0	170	1833
31	REUT0031	REUTLINGEN	Urselberg	M	18	WKL	198	1805	2002	0	198	1805
32	REUT0032	REUTLINGEN	Urselberg	n	21	WKL	165	1838	2002	10	175	1828
33	REUT0033	REUTLINGEN	Urselberg	n	34	WKL	259	1744	2002	10	269	1734

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	PLIE0001	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	23	WKL	181	1819	1999	0	181	1819
2	PLIE0002	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	16	WKL	135	1865	1999	0	135	1865
3	PLIE0003	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	-	-	177	1822	1998	0	177	1822
4	PLIE0004	PLIENINGEN	Plieninger Forst	n	16	WKL	178	1822	1999	10	188	1812
5	PLIE0005	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	15	WKL	181	1819	1999	0	181	1819
6	PLIE0006	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	15	WKL	179	1821	1999	0	179	1821
7	PLIE0007	PLIENINGEN	Plieninger Forst	-	-	-	127	1845	1971	?	127	1845
8	PLIE0008	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	15	WKL	180	1820	1999	0	180	1820
9	PLIE0009	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	19	WKL	179	1821	1999	0	179	1821
10	PLIE0010	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	19	WKL	179	1821	1999	0	179	1821
11	PLIE0011	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	15	WKL	178	1822	1999	0	178	1822
12	PLIE0012	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	16	WKL	158	1842	1999	0	158	1842
13	PLIE0013	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	15	WKL	166	1834	1999	0	166	1834
14	PLIE0014	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	18	WKL	176	1824	1999	0	176	1824
15	PLIE0015	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	25	WKL	179	1821	1999	0	179	1821
16	PLIE0016	PLIENINGEN	Plieninger Forst	n	-	-	173	1823	1995	10	183	1813
17	PLIE0017	PLIENINGEN	Plieninger Forst	-	29	WKL	176	1824	1999	12	188	1812
18	PLIE0018	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	17	WKL	180	1820	1999	0	180	1820
19	PLIE0019	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	21	WKL	155	1845	1999	0	155	1845
20	PLIE0020	PLIENINGEN	Plieninger Forst	n	-	-	169	1821	1989	10	179	1811
21	PLIE0021	PLIENINGEN	Plieninger Forst	M	25	WKL	181	1819	1999	0	181	1819

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	OPPE0003	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	188	1808	1995	0	188	1808
2	OPPE0004	OPPENHEIM	Kühkopf	n	-	-	148	1847	1994	2	150	1845
3	OPPE0005	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	164	1832	1995	0	164	1832
4	OPPE0006	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	152	1843	1994	0	152	1843
5	OPPE0007	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	137	1858	1994	0	137	1858
6	OPPE0012	OPPENHEIM	Kühkopf	n	-	-	184	1812	1995	5	189	1807
7	OPPE0013	OPPENHEIM	Kühkopf	n	-	-	172	1823	1994	7	179	1816
8	OPPE0017	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	135	1848	1982	0	135	1848
9	OPPE0019	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	112	1881	1992	0	112	1881
10	OPPE0020	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	107	1884	1990	0	107	1884
11	OPPE0027	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	131	1841	1971	0	131	1841

12	OPPE0028	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	104	1848	1951	0	104	1848
13	OPPE0029	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	159	1802	1960	0	159	1802
14	OPPE0030	OPPENHEIM	Kühkopf	n	-	-	150	1814	1963	6	156	1808
15	OPPE0034	OPPENHEIM	Kühkopf	M	18	WKL	154	1844	1997	0	154	1844
16	OPPE0037	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	153	1839	1991	0	153	1839
17	OPPE0038	OPPENHEIM	Kühkopf	M	-	-	145	1848	1992	0	145	1848

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	809	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			-	129	1868	1996		129	1868
2	1011	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			-	119	1878	1996		119	1878
3	1213	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			-	116	1881	1996		116	1881
4	1415	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WK?	136	1861	1996		136	1861
5	1617	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	113	1884	1996		113	1884
6	1819	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WK?	113	1883	1995		113	1883
7	2021	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	127	1870	1996		127	1870
8	22	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	125	1872	1996		125	1872
9	23	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	129	1868	1996		129	1868
10	7	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	123	1874	1996		123	1874
11	1	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	168	1829	1996		168	1829
12	3	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	147	1850	1996		147	1850
13	4	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	137	1860	1996		137	1860
14	5	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	160	1833	1992		160	1833
15	2	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKL	148	1849	1996		148	1849
16	6	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			WKE	141	1852	1992		141	1852
17	120	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			-	129	1869	1997		129	1869
18	220	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			-	127	1871	1997		127	1871
19	420	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			-	124	1869	1992		124	1869
20	320	LAMPERTHEIM	Lampertheimer Forst			-	124	1869	1992		124	1869

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	WERT0001	WERTHEIM	Staustufe	M	6	WKE	14	1991	2004	0	14	1991
2	WERT0002	WERTHEIM	Staustufe	M	7	WKE	22	1983	2004	0	22	1983
3	WERT0003	WERTHEIM	Staustufe	n	8	WKE	39	1966	2004	2	41	1964
4	WERT0004	WERTHEIM	Staustufe	n	10	WKE	32	1973	2004	1	33	1972
5	WERT0005	WERTHEIM	Staustufe	n	8	WKE	30	1975	2004	2	32	1973
6	WERT0006	WERTHEIM	Staustufe	n	10	WKE	36	1969	2004	4	40	1965
7	WERT0007	WERTHEIM	Staustufe	n	19	WKE	106	1899	2004	3	109	1896
8	WERT0008	WERTHEIM	Staustufe	n	19	WKE	106	1899	2004	2	108	1897
9	WERT0009	WERTHEIM	Staustufe	n	16	WKE	106	1899	2004	3	109	1896
10	WERT0010	WERTHEIM	Staustufe	n	21	WKE	95	1910	2004	8	103	1902
11	WERT0011	WERTHEIM	Staustufe	n	20	WKE	109	1896	2004	1	110	1895
12	WERT0012	WERTHEIM	Staustufe	n	14	WKE	108	1897	2004	1	109	1896

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	RUST0001	RUST2006	Taubergießen	n	17	WKL	110	1896	2005	3	113	1893
2	RUST0002	RUST2006	Taubergießen	n	-	-	102	1885	1986	2	104	1883
3	RUST0003	RUST2006	Taubergießen	n	14	WKL	145	1861	2005	4	149	1857
4	RUST0004	RUST2006	Taubergießen	n	17	WKL	146	1860	2005	2	148	1858
5	RUST0005	RUST2006	Taubergießen	n	15	WKL	114	1892	2005	4	118	1888
6	RUST0006	RUST2006	Taubergießen	-	23	WKL	137	1869	2005	7	144	1862
7	RUST0007	RUST2006	Taubergießen	M	-	-	120	1884	2003	0	120	1884
8	RUST0008	RUST2006	Taubergießen	n	-	-	136	1864	1999	4	140	1860
9	RUST0009	RUST2006	Taubergießen	n	-	-	136	1863	1998	2	138	1861
10	RUST0010	RUST2006	Taubergießen	n	-	-	96	1905	2000	10	106	1895

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	LEIM0001	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	n	14	WKL	121	1885	2005	3	124	1882
2	LEIM0002	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	n	11	WKL	113	1893	2005	7	120	1886
3	LEIM0003	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	M	16	WKL	126	1880	2005	0	126	1880
4	LEIM0004	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	n	13	WKL	105	1901	2005	6	111	1895
5	LEIM0005	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	n	15	WKL	90	1916	2005	13	103	1903
6	LEIM0006	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	n	23	WKL	107	1899	2005	3	110	1896
7	LEIM0007	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	n	18	WKL	115	1891	2005	3	118	1888
8	LEIM0008	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	-	20	WKL	115	1891	2005	9	124	1882
9	LEIM0009	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	-	16	WKL	102	1904	2005	5	107	1899
10	LEIM0012	LEIMERSHEIM	Steinholzdeich	-	10	WKL	103	1903	2005	10	113	1893

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	FREU0001	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	n	8	WKE	53	1952	2004	3	56	1949
2	FREU0002	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	n	10	WKE	90	1915	2004	3	93	1912
3	FREU0003	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	M	14	WKE	79	1926	2004	0	79	1926
4	FREU0004	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	n	10	WKE	64	1941	2004	3	67	1938
5	FREU0005	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	n	12	WKE	92	1913	2004	8	100	1905
6	FREU0006	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	-	13	WKE	81	1924	2004	6	87	1918
7	FREU0007	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	M	17	WKE	76	1929	2004	0	76	1929
8	FREU0008	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	M	15	WKE	102	1903	2004	0	102	1903
9	FREU0009	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	n	15	WKE	103	1902	2004	2	105	1900
10	FREU0010	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	n	19	WKE	99	1906	2004	5	104	1901
11	FREU0011	FREUDENBERG	Räuberschlößchen	n	12	WKE	67	1938	2004	2	69	1936

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	FAUL0001	FAULBACH	Heckenkopf	n	17	WKE	46	1959	2004	3	49	1956
2	FAUL0002	FAULBACH	Heckenkopf	n	15	WKE	53	1952	2004	2	55	1950
3	FAUL0003	FAULBACH	Heckenkopf	n	20	WKE	104	1901	2004	20	124	1881
4	FAUL0004	FAULBACH	Heckenkopf	n	16	WKE	78	1927	2004	2	80	1925
5	FAUL0005	FAULBACH	Heckenkopf	n	16	WKE	65	1940	2004	5	70	1935
6	FAUL0006	FAULBACH	Heckenkopf	n	11	WKE	46	1959	2004	10	56	1949
7	FAUL0007	FAULBACH	Heckenkopf	n	14	WKE	39	1966	2004	1	40	1965
8	FAUL0008	FAULBACH	Heckenkopf	n	19	WKE	64	1941	2004	5	69	1936
9	FAUL0009	FAULBACH	Heckenkopf	n	15	WKE	89	1916	2004	3	92	1913
10	FAUL0010	FAULBACH	Heckenkopf	n	15	WKE	80	1925	2004	4	84	1921

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	FAHR0002	FAHR	Elgersheimer Hof	M	5	WKE	17	1988	2004	0	17	1988
2	FAHR0003	FAHR	Elgersheimer Hof	M	5	WKE	15	1990	2004	0	15	1990
3	FAHR0004	FAHR	Elgersheimer Hof	M	7	WKE	22	1983	2004	0	22	1983
4	FAHR0005	FAHR	Elgersheimer Hof	n	9	WKE	23	1982	2004	1	24	1981
5	FAHR0006	FAHR	Elgersheimer Hof	n	11	WKE	50	1955	2004	1	51	1954
6	FAHR0007	FAHR	Elgersheimer Hof	n	12	WKE	43	1962	2004	2	45	1960

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	EUER0001	EUERHEIM	Eichholz	M	14	WKE	157	1848	2004	0	157	1848
2	EUER0002	EUERHEIM	Eichholz	n	16	WKE	147	1858	2004	5	152	1853
3	EUER0003	EUERHEIM	Eichholz	-	11	WKE	71	1934	2004	8	79	1926
4	EUER0004	EUERHEIM	Eichholz	n	15	WKE	97	1908	2004	4	101	1904
5	EUER0005	EUERHEIM	Eichholz	n	18	WKE	97	1908	2004	3	100	1905
6	EUER0006	EUERHEIM	Eichholz	n	12	WKE	78	1927	2004	4	82	1923
7	EUER0007	EUERHEIM	Eichholz	n	15	WKE	83	1922	2004	9	92	1913

8	EUER0008	EUERHEIM	Eichholz	M	14	WKE	91	1914	2004	0	91	1914
9	EUER0009	EUERHEIM	Eichholz	M	6	WKE	73	1932	2004	0	73	1932
10	EUER0010	EUERHEIM	Eichholz	n	16	WKE	152	1853	2004	2	154	1851
11	EUER0011	EUERHEIM	Eichholz	n	17	WKE	143	1862	2004	2	145	1860

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	ESCH0001	ESCHERNDORF	Vogelsburg	n	13	WKE	72	1933	2004	6	78	1927
2	ESCH0002	ESCHERNDORF	Vogelsburg	M	10	WKE	117	1888	2004	0	117	1888
3	ESCH0003	ESCHERNDORF	Vogelsburg	-	18	WKE	89	1916	2004	12	101	1904
4	ESCH0004	ESCHERNDORF	Vogelsburg	n	22	WKE	110	1895	2004	20	130	1875
5	ESCH0005	ESCHERNDORF	Vogelsburg	n	20	WKE	113	1892	2004	10	123	1882
6	ESCH0006	ESCHERNDORF	Vogelsburg	n	20	WKE	136	1869	2004	6	142	1863
7	ESCH0007	ESCHERNDORF	Vogelsburg	n	17	WKE	105	1900	2004	2	107	1898
8	ESCH0008	ESCHERNDORF	Vogelsburg	n	25	WKE	75	1930	2004	2	77	1928

No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	DETT0001	DETTELBACH	Paradies	n	12	WKE	116	1889	2004	6	122	1883
2	DETT0002	DETTELBACH	Paradies	M	11	WKE	136	1869	2004	0	136	1869
3	DETT0003	DETTELBACH	Paradies	n	13	WKE	118	1887	2004	4	122	1883
4	DETT0004	DETTELBACH	Paradies	n	12	WKE	133	1872	2004	1	134	1871
5	DETT0005	DETTELBACH	Paradies	n	13	WKE	131	1874	2004	9	140	1865
6	DETT0006	DETTELBACH	Paradies	n	14	WKE	121	1884	2004	8	129	1876
7	DETT0007	DETTELBACH	Paradies	n	14	WKE	64	1941	2004	3	67	1938
8	DETT0008	DETTELBACH	Paradies	n	15	WKE	126	1879	2004	8	134	1871
9	DETT0009	DETTELBACH	Paradies	n	11	WKE	133	1872	2004	3	136	1869
10	DETT0010	DETTELBACH	Paradies	n	15	WKE	131	1874	2004	4	135	1870
11	DETT0011	DETTELBACH	Paradies	M	15	WKE	136	1869	2004	0	136	1869

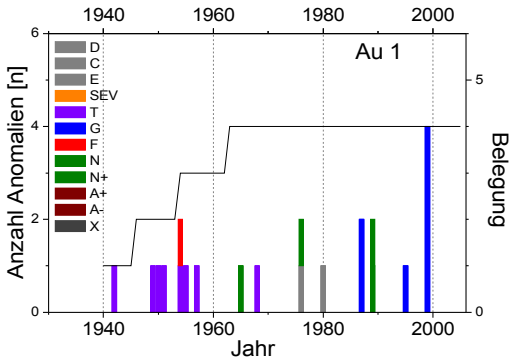
No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	BAUN0001	BAUNACH	Galgenberg	n	13	WKE	41	1964	2004	6	47	1958
2	BAUN0002	BAUNACH	Galgenberg	n	15	WKE	59	1946	2004	1	60	1945
3	BAUN0003	BAUNACH	Galgenberg	n	13	WKE	39	1966	2004	3	42	1963
4	BAUN0004	BAUNACH	Galgenberg	M	17	WKE	53	1952	2004	0	53	1952
5	BAUN0005	BAUNACH	Galgenberg	M	12	WKE	55	1950	2004	0	55	1950
6	BAUN0006	BAUNACH	Galgenberg	n	16	WKE	45	1960	2004	2	47	1958
7	BAUN0007	BAUNACH	Galgenberg	n	9	WKE	43	1962	2004	1	44	1961
8	BAUN0008	BAUNACH	Galgenberg	M	9	WKE	59	1946	2004	0	59	1946
9	BAUN0009	BAUNACH	Galgenberg	M	13	WKE	54	1951	2004	0	54	1951

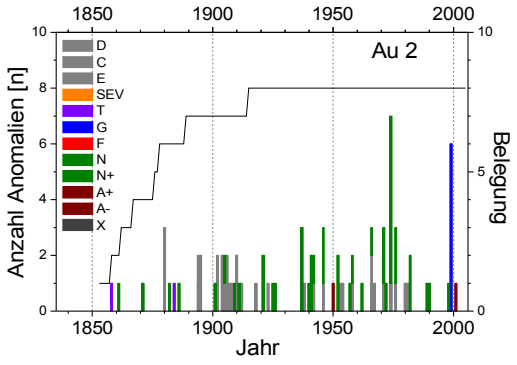
No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	AURH0001	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	19	WKL	66	1940	2005	7	73	1933
2	AURH0002	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	15	WKL	52	1954	2005	3	55	1951
3	AURH0003	AU AM RHEIN	Veldesgrund	M	7	WKL	43	1963	2005	0	43	1963
4	AURH0004	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	14	WKL	60	1946	2005	8	68	1938
5	AURH0005	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	49	WKL	114	1892	2005	10	124	1882
6	AURH0006	AU AM RHEIN	Veldesgrund	-	70	WKL	138	1868	2005	14	152	1854
7	AURH0007	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	11	WKL	117	1889	2005	2	119	1887
8	AURH0008	AU AM RHEIN	Veldesgrund	-	25	WKL	100	1906	2005	13	113	1893
9	AURH0009	AU AM RHEIN	Veldesgrund	-	13	WKL	139	1867	2005	11	150	1856
10	AURH0010	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	16	WKL	148	1858	2005	2	150	1856
11	AURH0011	AU AM RHEIN	Veldesgrund	-	11	WKL	130	1876	2005	10	140	1866
12	AURH0012	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	22	WKL	153	1853	2005	7	160	1846
13	AURH0013	AU AM RHEIN	Veldesgrund	-	21	WKL	144	1862	2005	8	152	1854
14	AURH0014	AU AM RHEIN	Veldesgrund	-	12	WKL	91	1915	2005	9	100	1906

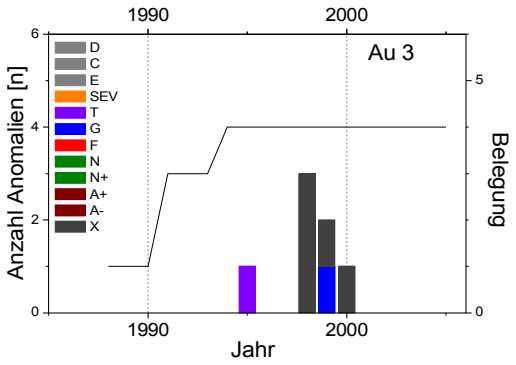
15	AURH0015	AU AM RHEIN	Veldesgrund	-	7	WKL	128	1878	2005	10	138	1868
16	AURH0016	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	6	WKL	15	1991	2005	1	16	1990
17	AURH0017	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	7	WKL	15	1991	2005	2	17	1989
18	AURH0018	AU AM RHEIN	Veldesgrund	M	7	WKL	18	1988	2005	0	18	1988
19	AURH0019	AU AM RHEIN	Veldesgrund	n	6	WKL	12	1994	2005	2	14	1992

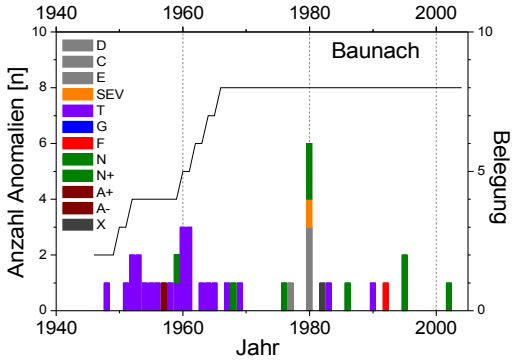
No.	Key-Code	Location		P	SWR	WK?	Length	Begin	DateEnd	J. bis Mark	Länge (geschätzt)	Beginn (geschätzt)
1	RIED0001	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	19	WKL	195	1807	2001	3	198	1804
2	RIED0002	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	-	11	WKL	216	1786	2001	18	234	1768
3	RIED0003	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	-	24	WKL	166	1836	2001	16	182	1820
4	RIED0004	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	7	WKL	56	1946	2001	3	59	1943
5	RIED0005	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	18	WKL	197	1805	2001	6	203	1799
6	RIED0006	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	-	24	WKL	198	1804	2001	12	210	1792
7	RIED0007	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	13	WKL	115	1887	2001	8	123	1879
8	RIED0008	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	M	15	WKL	129	1873	2001	0	129	1873
9	RIED0010	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	17	WKL	198	1804	2001	3	201	1801
10	RIED0011	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	10	WKL	59	1943	2001	3	62	1940
11	RIED0012	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	9	WKL	60	1942	2001	6	66	1936
12	RIED0013	RIEDLINGEN	Riedlinger Forst	n	11	WKL	66	1936	2001	2	68	1934

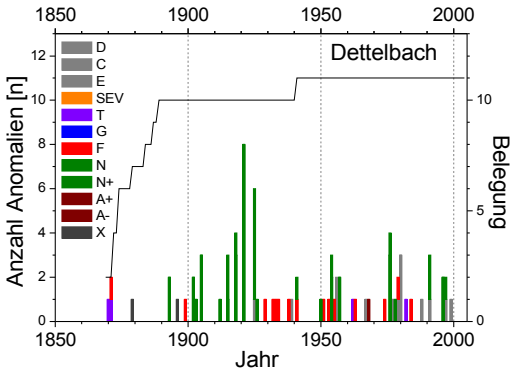
Anomaliegramme für alle untersuchten rezenten Eichen-Standorte

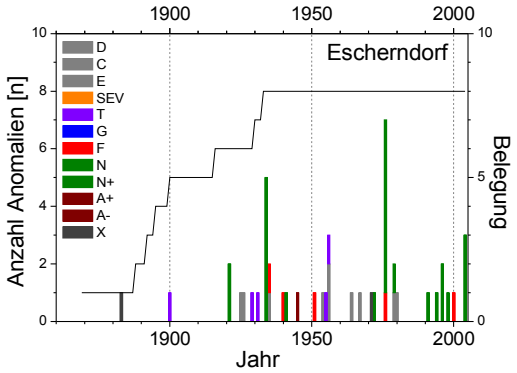


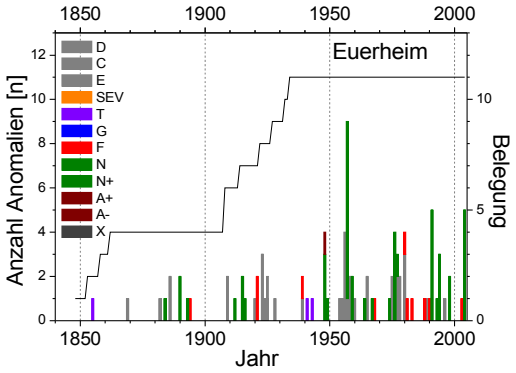


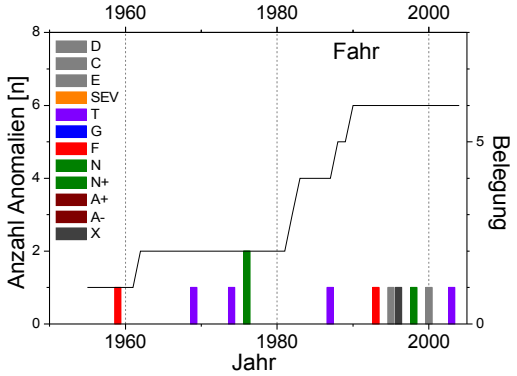


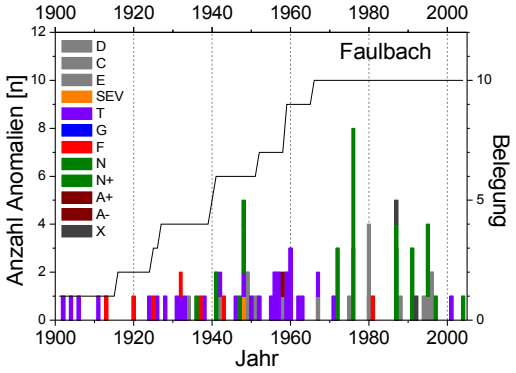


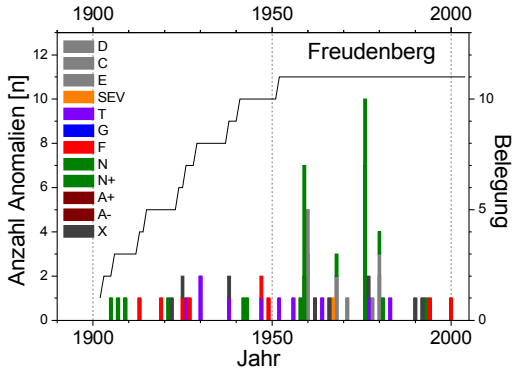


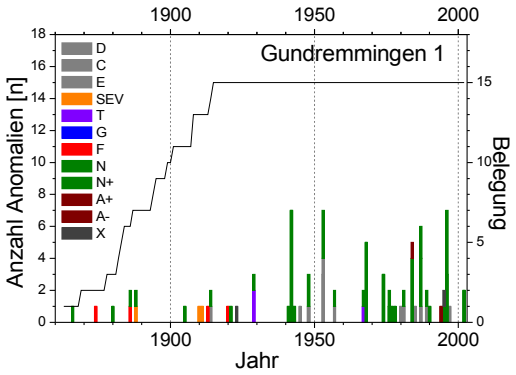


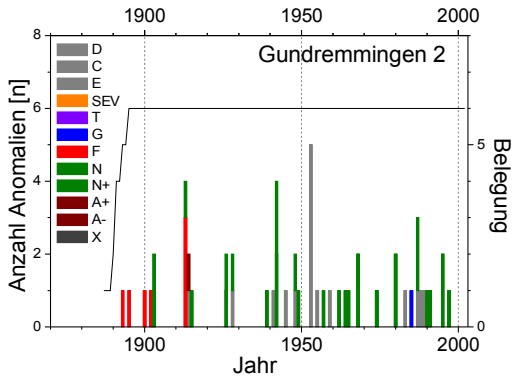


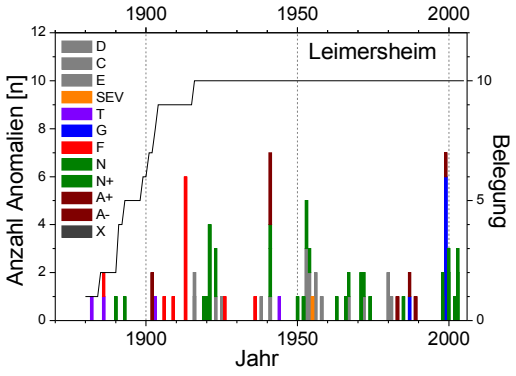


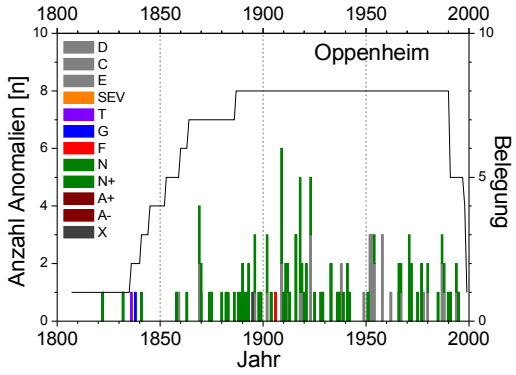

Faulbach
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

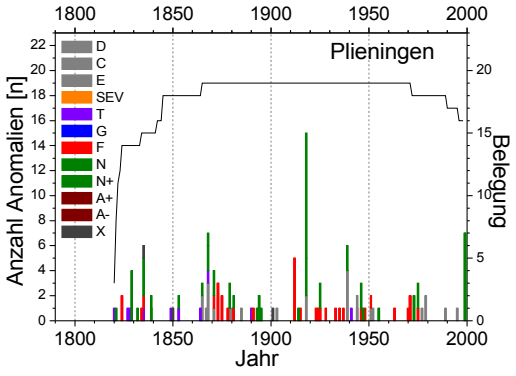

Freudenberg
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

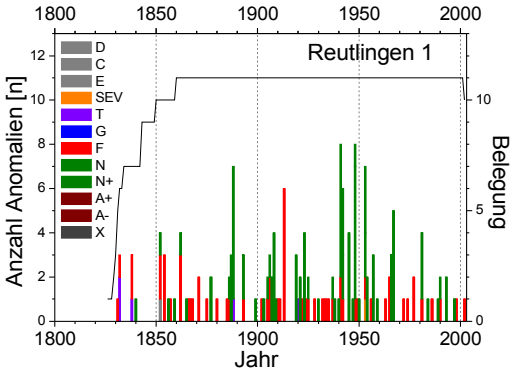

Gundremmingen 1
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

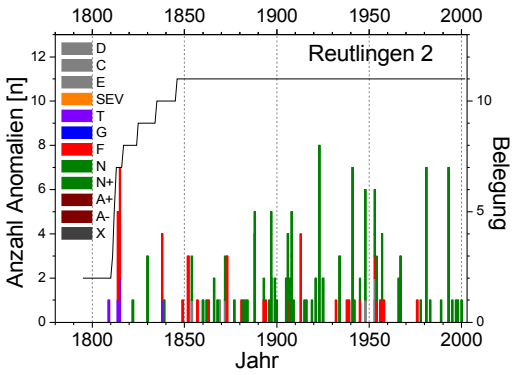

Gundremmingen 2
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

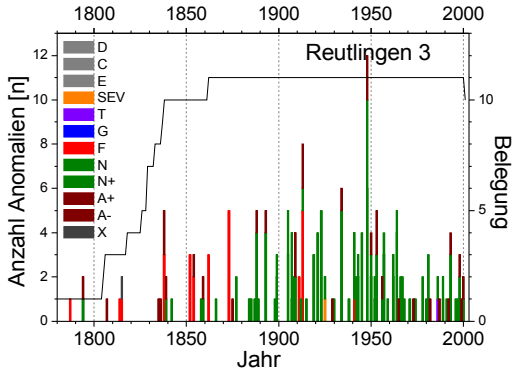

Leimersheim
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

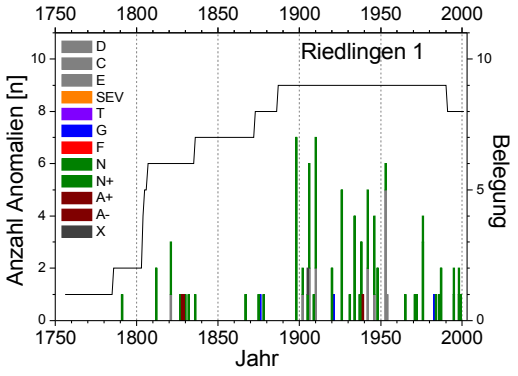

Oppenheim
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

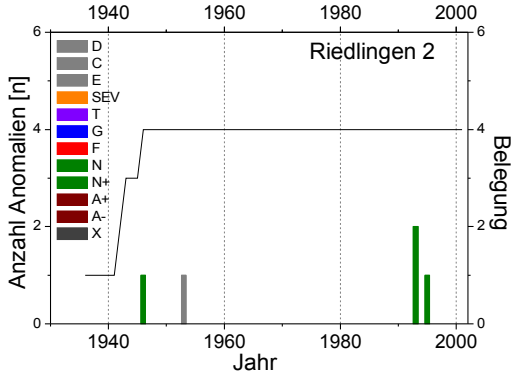

Plieningen
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

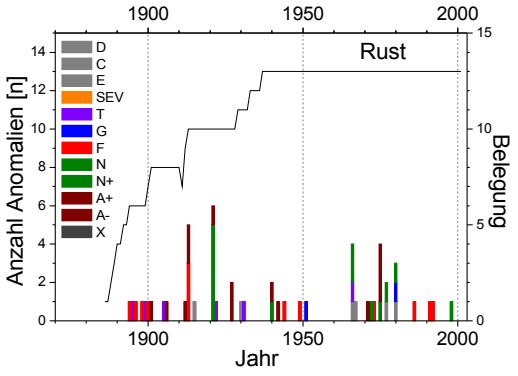

Reutlingen 1
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

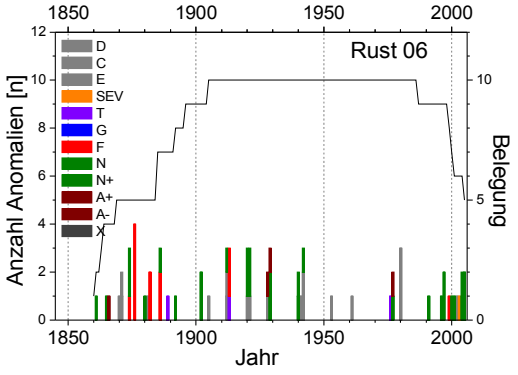

Reutlingen 2
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

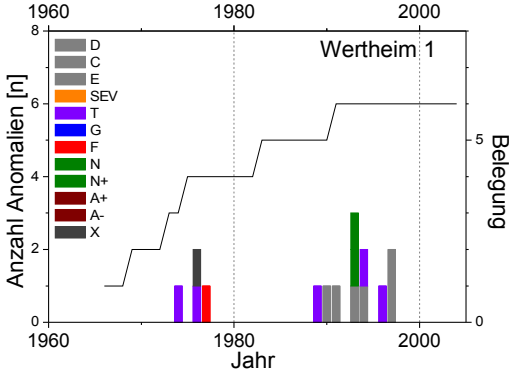

Reutlingen 3
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

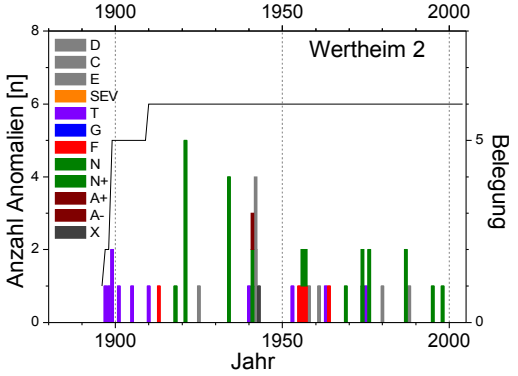

Riedlingen 1
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X


Riedlingen 2
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X


Rust
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X


Rust 06
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X


Wertheim 1
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

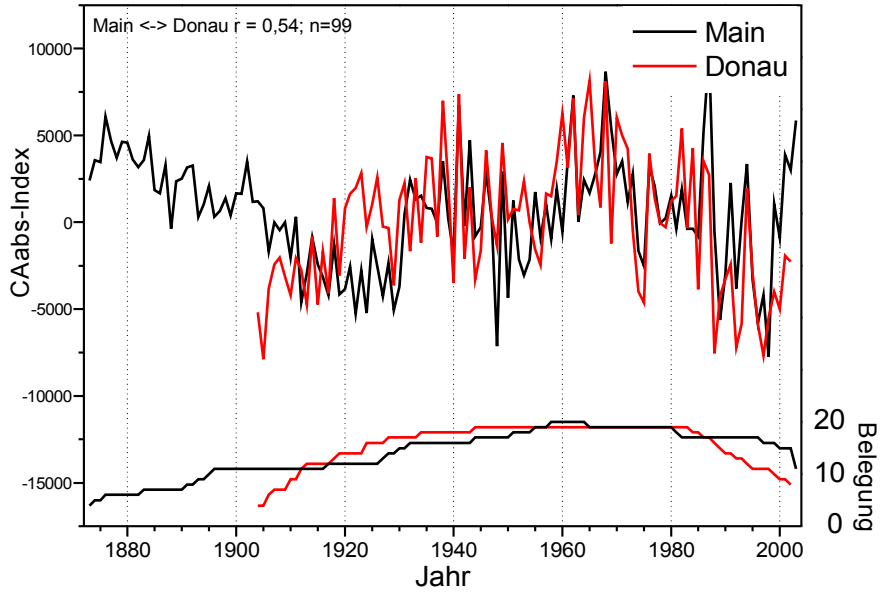

Wertheim 2
Anzahl Anomalien [n]
Belegung
Jahr
D
C
E
SEV
T
G
F
N
N+
A+
A-
X

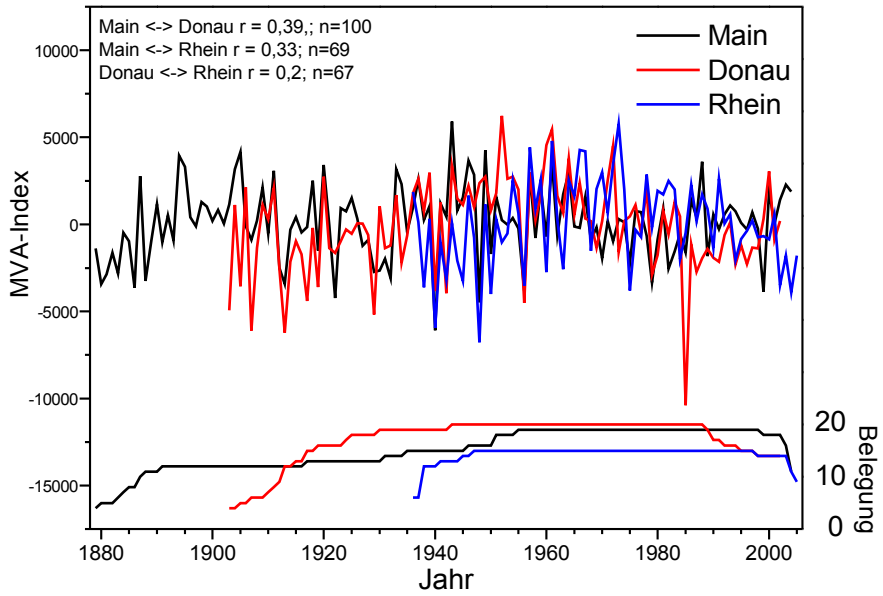
Korrelation (r) und Belegung (n) zwischen verschiedenen regionalen Frühholz-Gefäß-Chronologien (ab einer Belegung von 4 Bäumen)

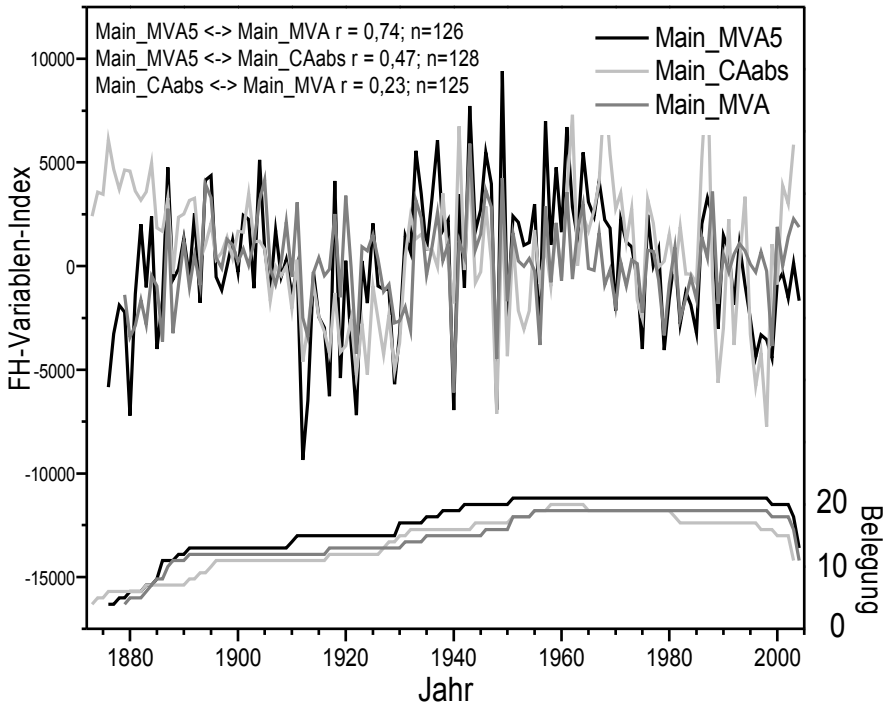
MVA = Mittlere Frühholz-Gefäßgröße (Mean Vessel Area)
MVA5 = Mediane Frühholz-Gefäßgröße der 5 größten aus erster Frühholzreihe (Median Vessel Area of 5 biggest in first row)
CAabs = Absolute Leitquerschnittsfläche (Conductive Area absolute)

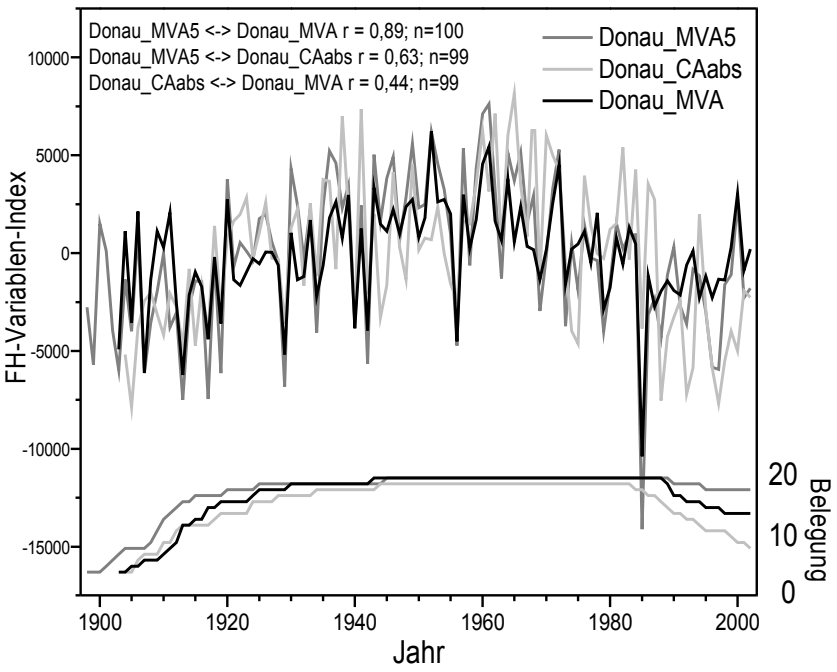
FH-Variablen_Korrelation	r	n
Main_MVA5 - Main_MVA	0,74	126
Main_MVA5 - Main_CAabs	0,47	128
Main_CAabs - Main_MVA	0,23	125
Donau_MVA5 - Donau_MVA	0,89	100
Donau_MVA5 - Donau_CAabs	0,63	99
Donau_CAabs - Donau_MVA	0,44	99
Rhein_MVA5 - Rhein_MVA	0,84	69
Main_MVA5 - Donau_MVA5	0,54	105
Main_MVA5 - Rhein_MVA5	0,55	69
Donau_MVA5 - Rhein_MVA5	0,28	67
Main_MVA - Donau_MVA	0,39	100
Main_D - Rhein_D	0,33	69
Donau_D - Rhein_D	0,20	67
Main_CAabs - Donau_CAabs	0,54	99

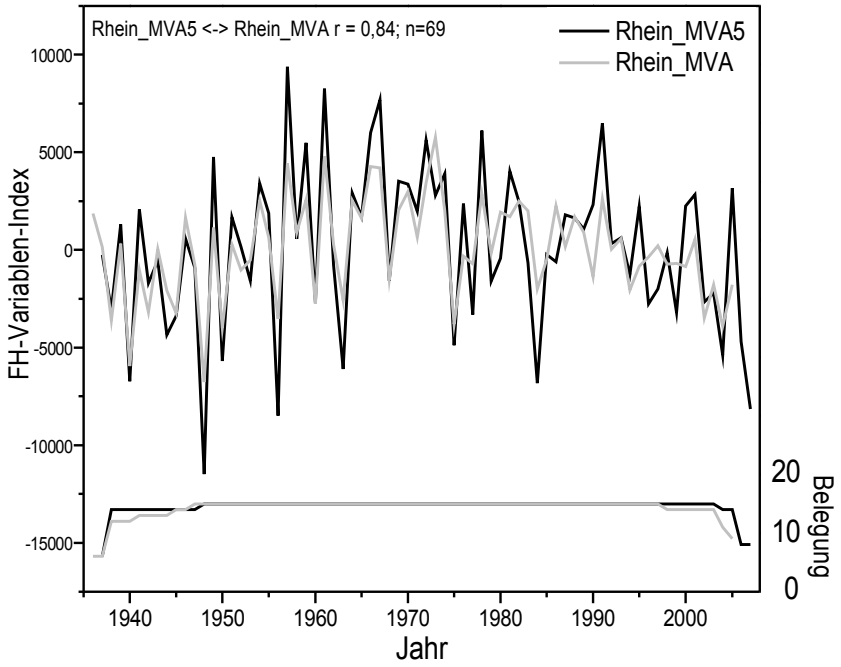
Synchronverlauf verschiedener regionaler Frühholz-Gefäß-Chronologien






Main_MVA5 <-> Main_MVA r = 0,74; n=126
Main_MVA5 <-> Main_CAabs r = 0,47; n=128
Main_CAabs <-> Main_MVA r = 0,23; n=125
Main_MVA5
Main_CAabs
Main_MVA
FH-Variablen-Index
Belegung
Jahr

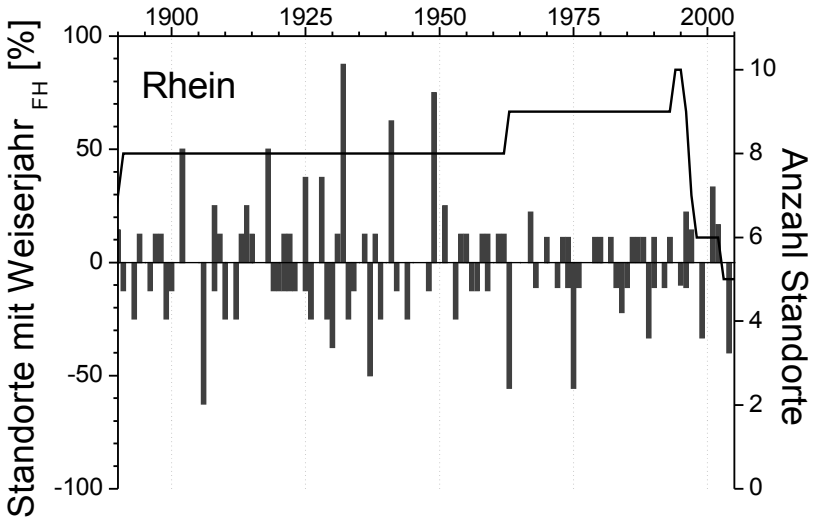

Donau_MVA5 <-> Donau_MVA r = 0,89; n=100
Donau_MVA5 <-> Donau_CAabs r = 0,63; n=99
Donau_CAabs <-> Donau_MVA r = 0,44; n=99
Donau_MVA5
Donau_CAabs
Donau_MVA
FH-Variablen-Index
Belegung
Jahr

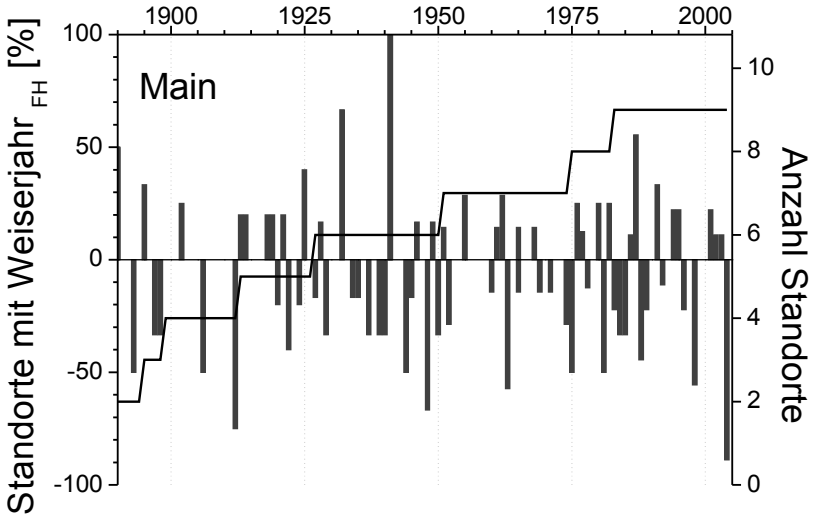


Frisch-, Trockengewicht [g] und Verhältnis von Trocken-/Frischgewicht [%] der entlaubten Versuchseichen (Frühjahr- und Sommer-Versuche)

Baum Nr.	Frisch-Gewicht [g]	Trocken-Gewicht [g]	Verhältnis Trocken-/Frischgewicht [%]
6	148,7	49,9	33,6
7	161,0	62,9	39,1
12	162,0	56,7	35,0
13	79,9	21,2	26,5
14	92,6	25,0	27,0
30	72,7	18,6	25,6
54	89,1	32,0	35,9
56	100,7	24,6	24,4
62	76,4	28,3	37,0
67	61,8	18,3	29,6
71	218,6	69,1	31,6

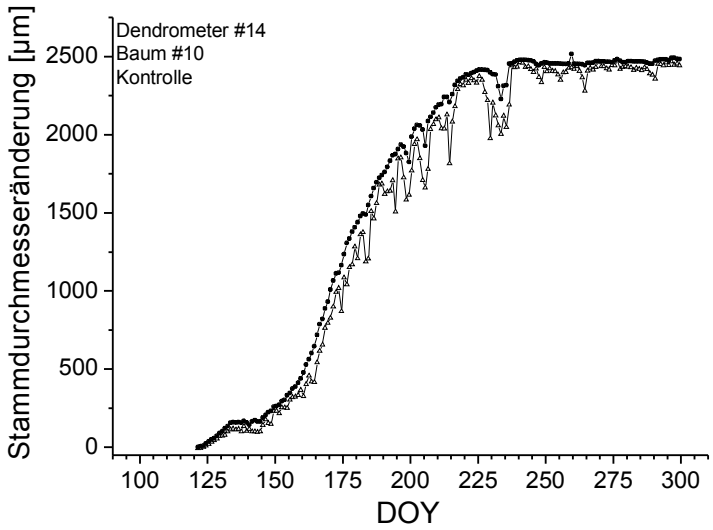
Frühholz-Weiserjahre für die Regionen Rhein und Main mit Angabe der Standortanzahl

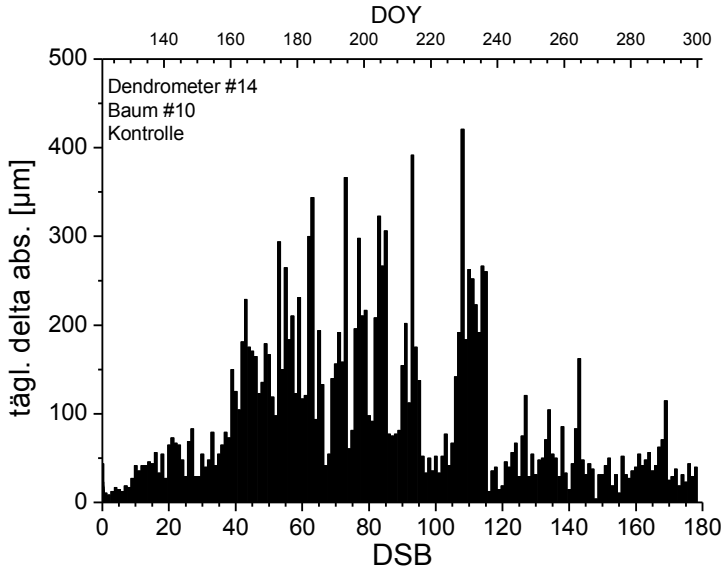


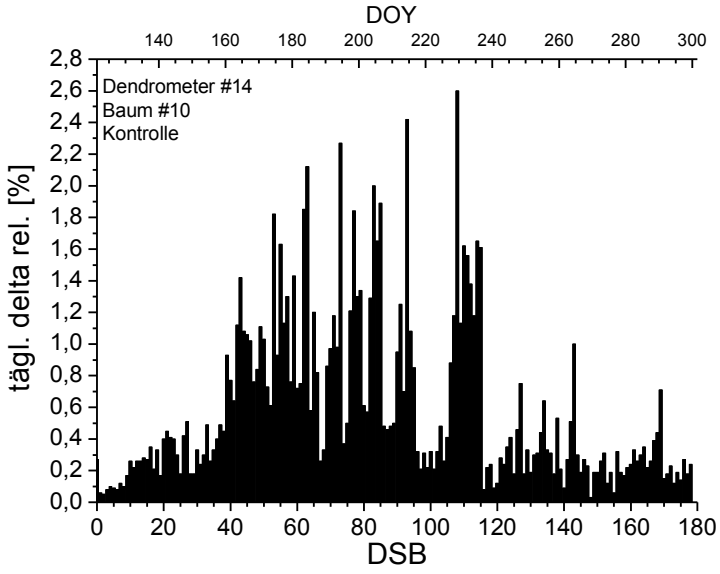


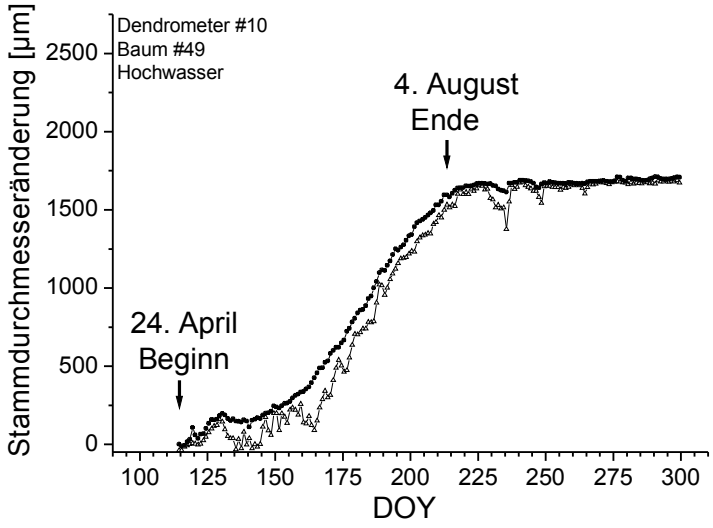
Begleitende Messungen der diametralen Stammdurchmesseränderungen (Versuchseichen). Die relativen Werte beziehen sich auf den Stammdurchmesser der jeweiligen Versuchseiche. Die folgende List gibt die Baumnummern der Versuchseichen und die jeweilige Simulation (Behandlung) an (evtl. Zahlen stehen für Dauer in Wochen).
TS = Trockenstress; Def = Defoliation; HW = Hochwasser

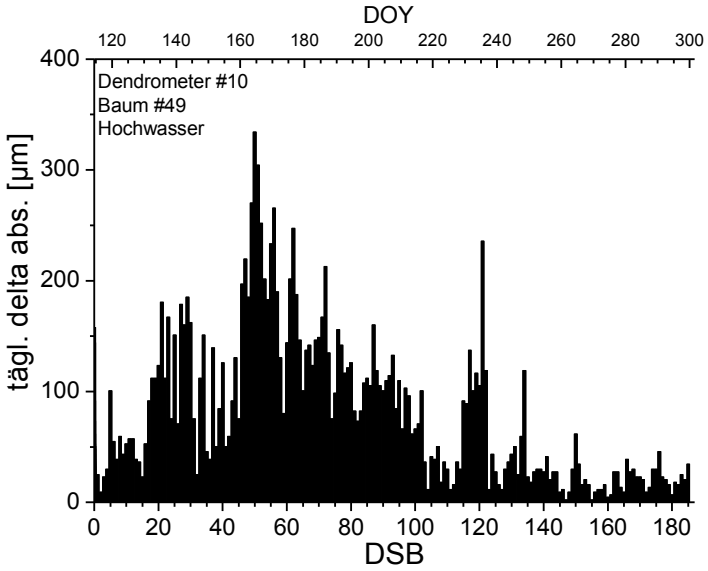
Baumnr.	Behandlung	Baumnr.	Behandlung
10	Kontrolle	6	Def spät
35	Kontrolle	7	Def spät
72	Kontrolle	12	Def spät
76	Kontrolle	54	Def spät
79	Kontrolle	62	Def spät
3	Frost früh	11	HW früh 4
26	Frost früh	21	HW früh 4
36	Frost früh	61	HW früh 4
47	Frost früh	17	HW früh 8
66	Frost früh	20	HW früh 8
28	Frost spät	27	HW früh 8
44	Frost spät	49	HW früh 12
59	Frost spät	50	HW früh 12
63	Frost spät	51	HW früh 12
65	Frost spät	68	HW früh 12
1	TS früh	46	HW spät 4
5	TS früh	53	HW spät 4
18	TS früh	58	HW spät 4
23	TS früh	77	HW spät 4
24	TS früh	40	HW spät 8
34	TS früh	41	HW spät 8
37	TS spät	43	HW spät 8
39	TS spät	70	HW spät 8
69	TS spät	15	HW spät 12
22	TS spät	31	HW spät 12
42	TS spät	33	HW spät 12
78	TS spät	74	HW spät 12
13	Def früh	32	HW Aug
14	Def früh	52	HW Aug
30	Def früh	55	HW Aug
56	Def früh	75	HW Aug
67	Def früh		
71	Def früh		

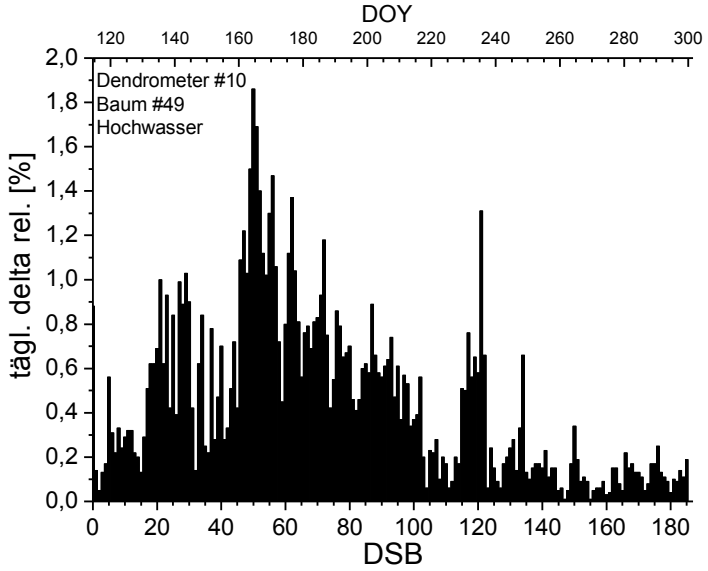

Dendrometer #14
Baum #10
Kontrolle
Stammdurchmesseränderung [µm]
0
500
1000
1500
2000
2500
100
125
150
175
200
225
250
275
300
DOY

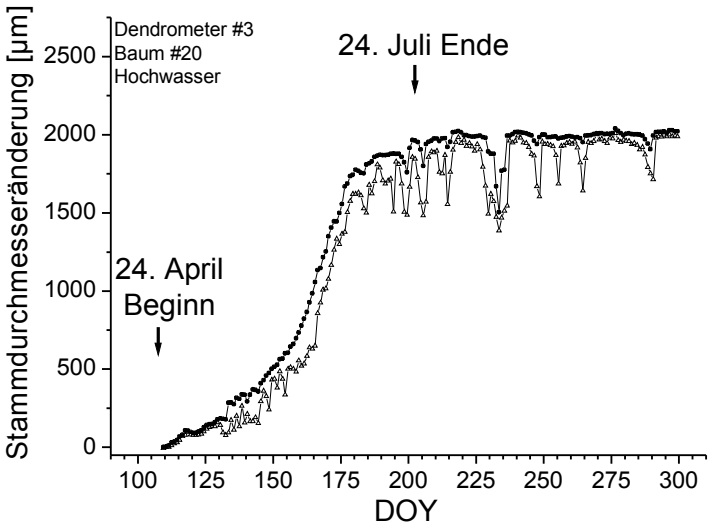

DOY
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Dendrometer #14
Baum #10
Kontrolle
tägl. delta abs. [µm]
0
100
200
300
400
500
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
DSB

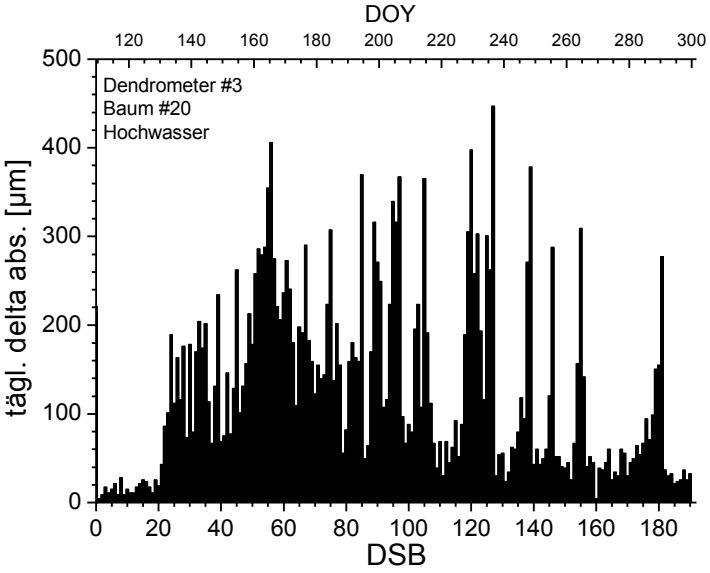

DOY
140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #14
Baum #10
Kontrolle
tägl. delta rel. [%]
2,8 2,6 2,4 2,2 2,0 1,8 1,6 1,4 1,2 1,0 0,8 0,6 0,4 0,2 0,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

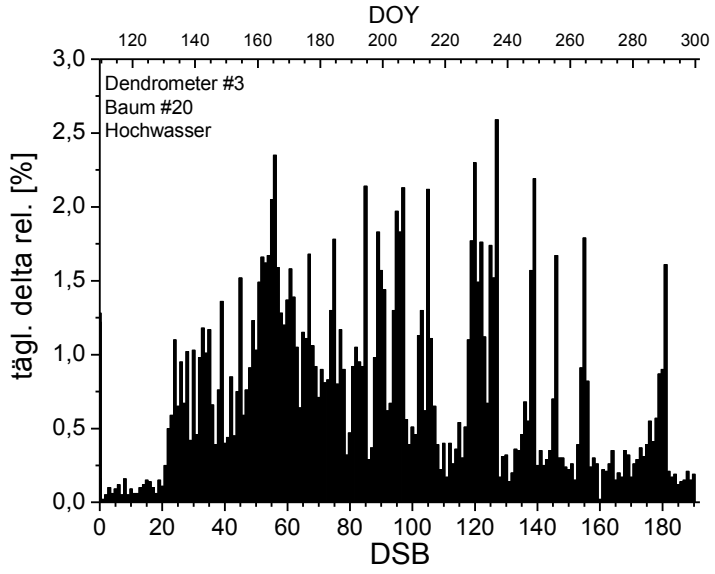

Dendrometer #10
Baum #49
Hochwasser
4. August
Ende
24. April
Beginn
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500 2000 1500 1000 500 0
100 125 150 175 200 225 250 275 300
DOY

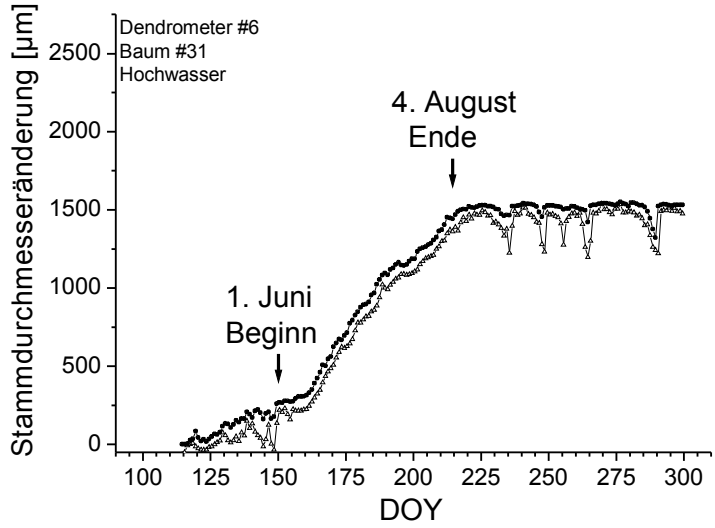

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #10
Baum #49
Hochwasser
tägl. delta abs. [µm]
0 100 200 300 400
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

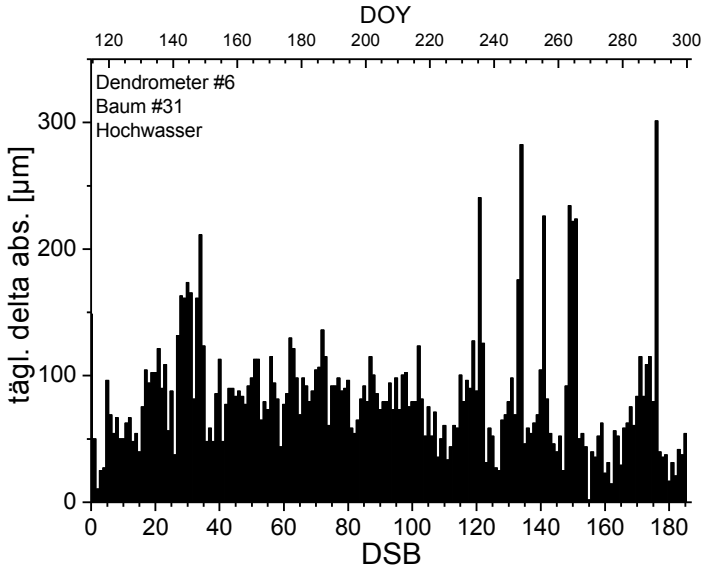

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #10
Baum #49
Hochwasser
tägl. delta rel. [%]
0,0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

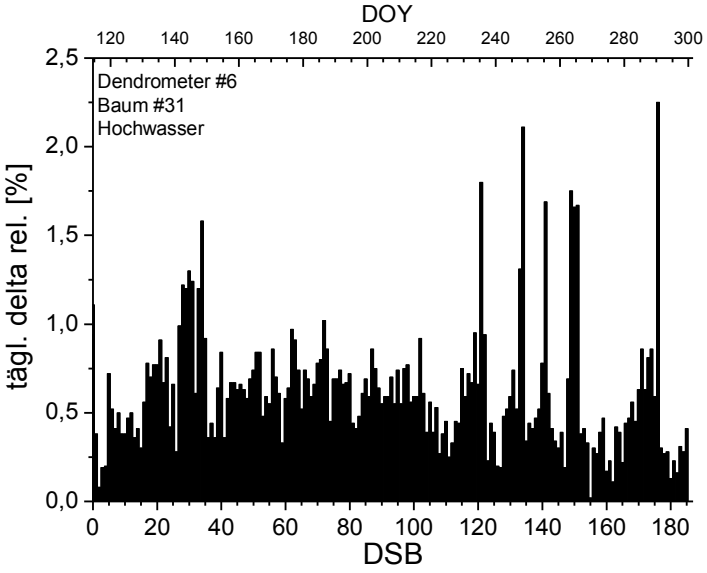

Dendrometer #3
Baum #20
Hochwasser
24. Juli Ende
24. April
Beginn
Stammdurchmesseränderung [µm]
0
500
1000
1500
2000
2500
100
125
150
175
200
225
250
275
300
DOY

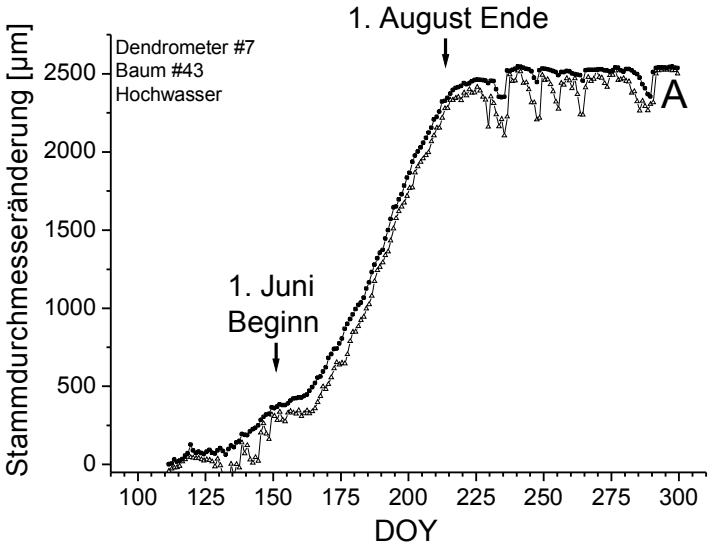

DOY
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Dendrometer #3
Baum #20
Hochwasser
tägl. delta abs. [µm]
0
100
200
300
400
500
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
DSB

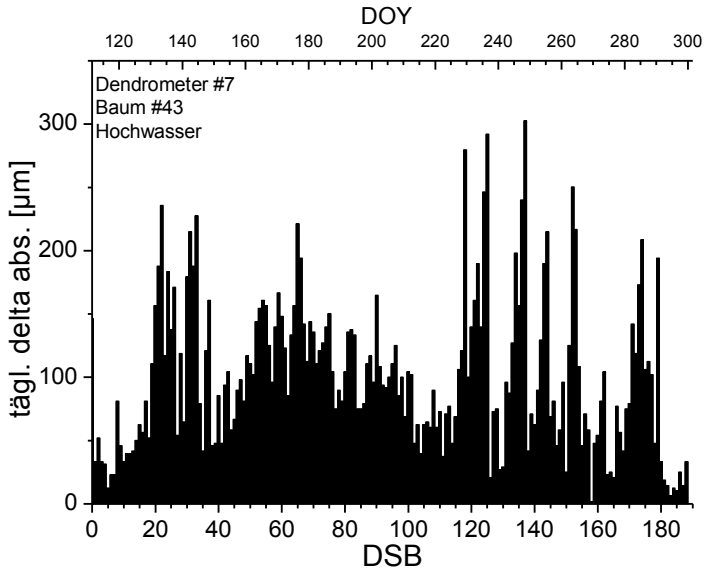

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #3
Baum #20
Hochwasser
tägl. delta rel. [%]
3,0 2,5 2,0 1,5 1,0 0,5 0,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

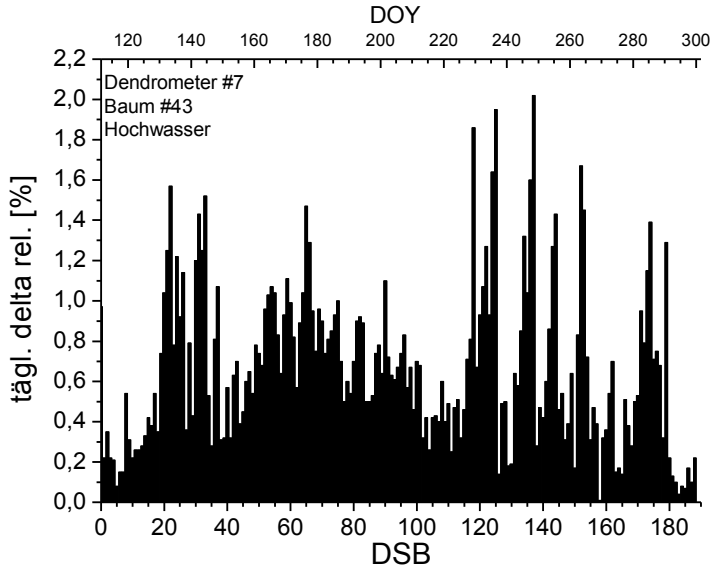

Dendrometer #6
Baum #31
Hochwasser
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500 2000 1500 1000 500 0
4. August
Ende
1. Juni
Beginn
100 125 150 175 200 225 250 275 300
DOY

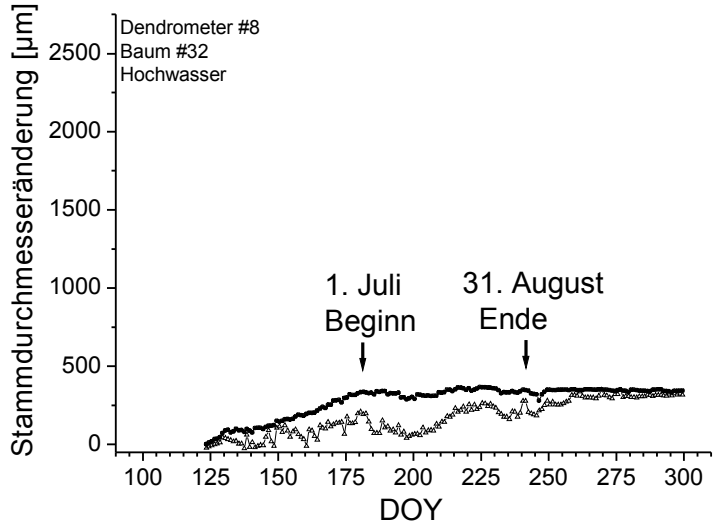

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #6
Baum #31
Hochwasser
tägl. delta abs. [µm]
0 100 200 300
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

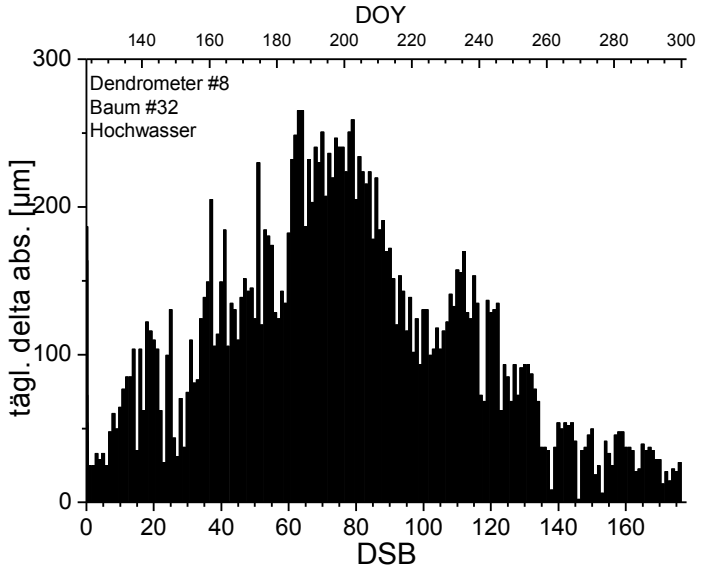

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #6
Baum #31
Hochwasser
tägl. delta rel. [%]
0,0 0,5 1,0 1,5 2,0 2,5
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

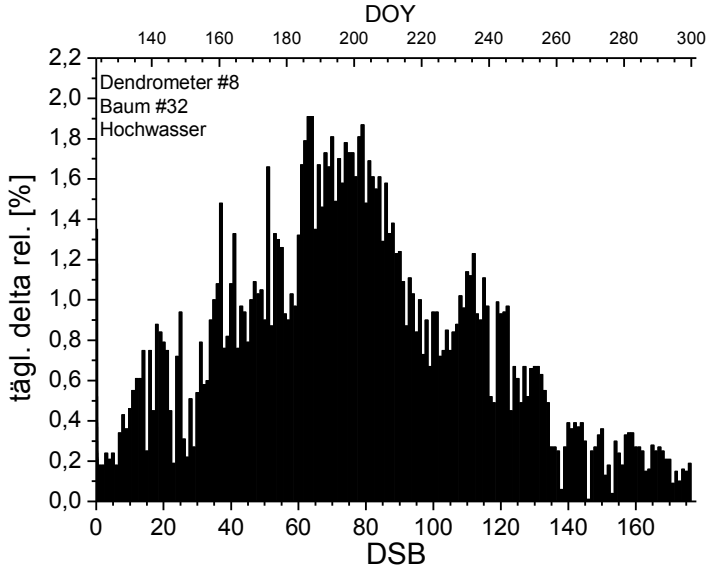

1. August Ende
Dendrometer #7
Baum #43
Hochwasser
A
1. Juni
Beginn
Stammdurchmesseränderung [µm]
0
500
1000
1500
2000
2500
100
125
150
175
200
225
250
275
300
DOY

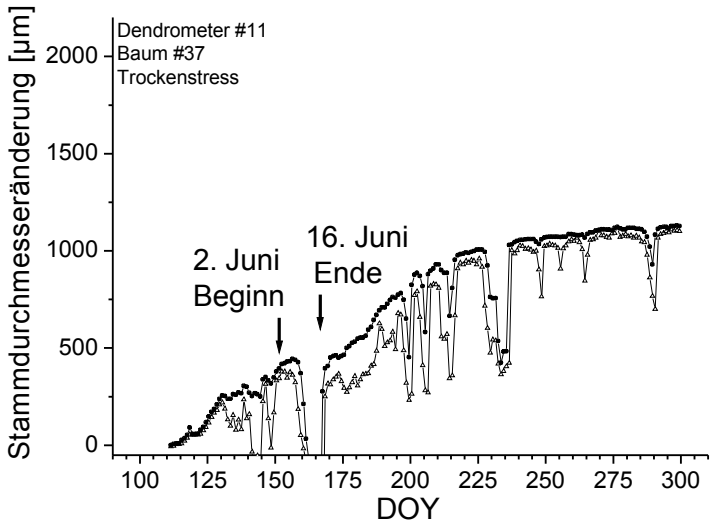

DOY
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Dendrometer #7
Baum #43
Hochwasser
tägl. delta abs. [µm]
0
100
200
300
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
DSB

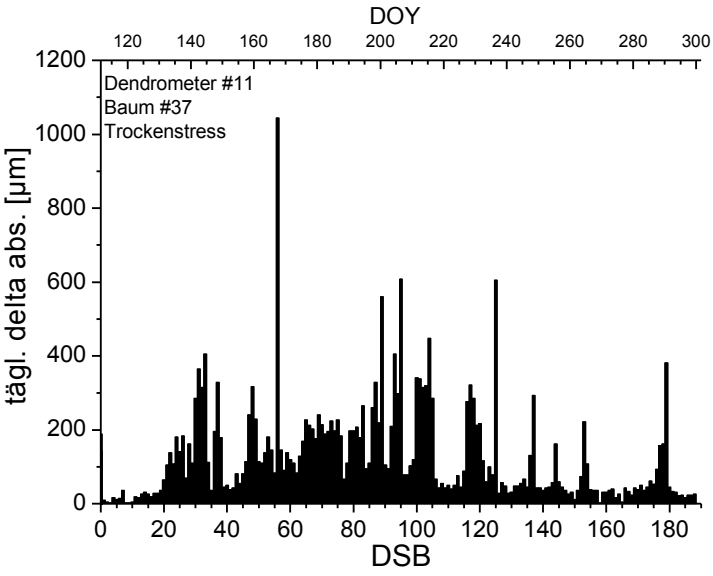

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #7
Baum #43
Hochwasser
tägl. delta rel. [%]
2,2 2,0 1,8 1,6 1,4 1,2 1,0 0,8 0,6 0,4 0,2 0,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

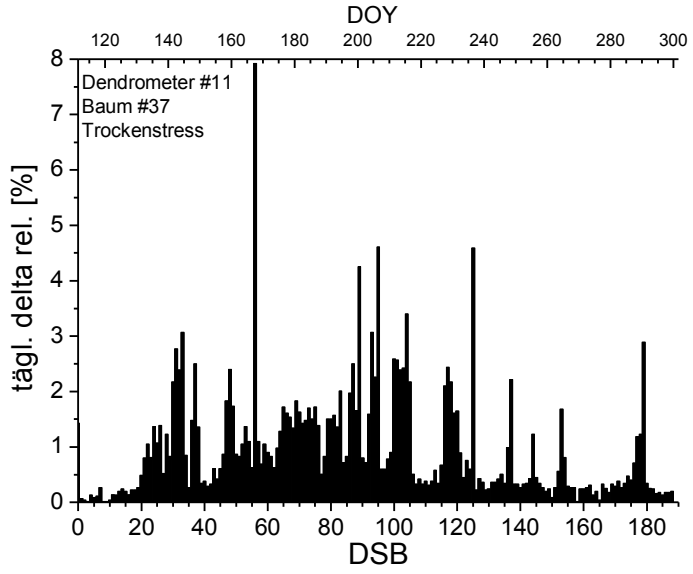

Dendrometer #8
Baum #32
Hochwasser
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500 2000 1500 1000 500 0
1. Juli
Beginn
31. August
Ende
100 125 150 175 200 225 250 275 300
DOY

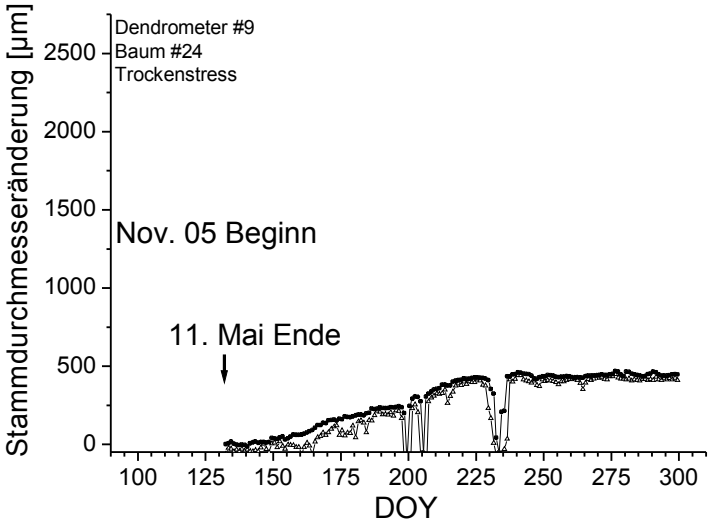

DOY
140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #8
Baum #32
Hochwasser
tägl. delta abs. [µm]
300
200
100
0
0 20 40 60 80 100 120 140 160
DSB

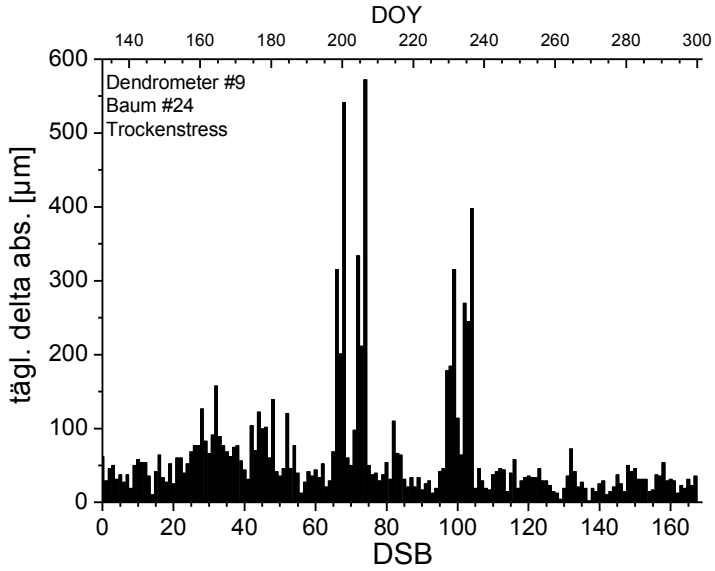

DOY
140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #8
Baum #32
Hochwasser
tägl. delta rel. [%]
2,2
2,0
1,8
1,6
1,4
1,2
1,0
0,8
0,6
0,4
0,2
0,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160
DSB

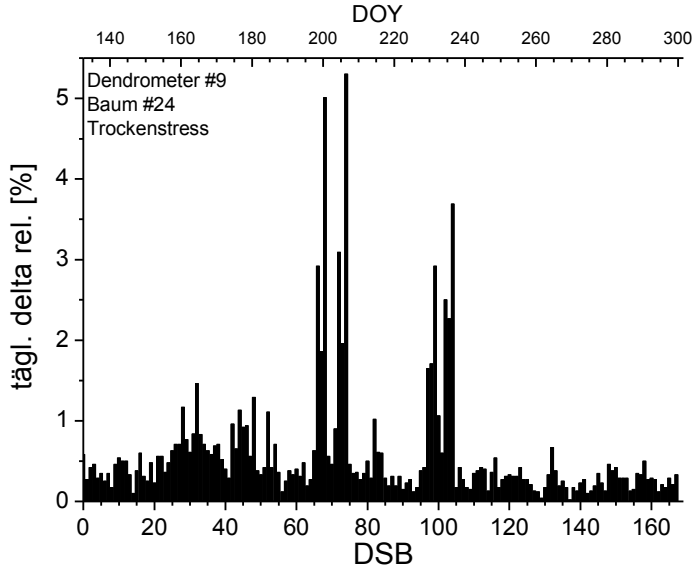

Dendrometer #11
Baum #37
Trockenstress
Stammdurchmesseränderung [µm]
2000
1500
1000
500
0
2. Juni
Beginn
16. Juni
Ende
100
125
150
175
200
225
250
275
300
DOY

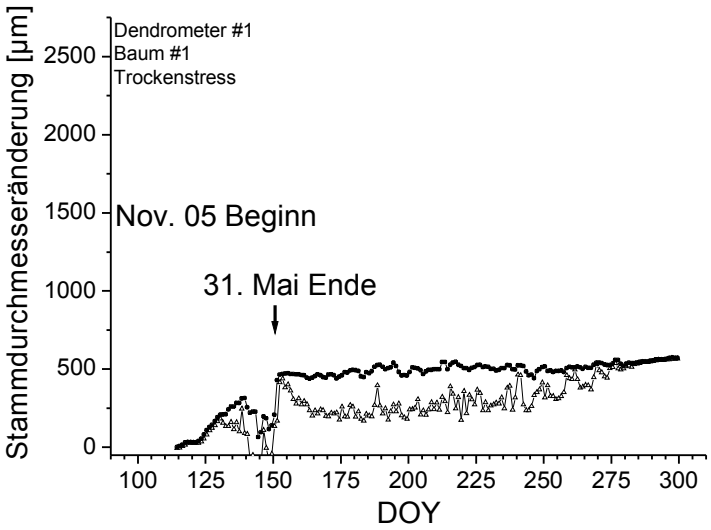

DOY
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Dendrometer #11
Baum #37
Trockenstress
tägl. delta abs. [µm]
1200
1000
800
600
400
200
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
DSB

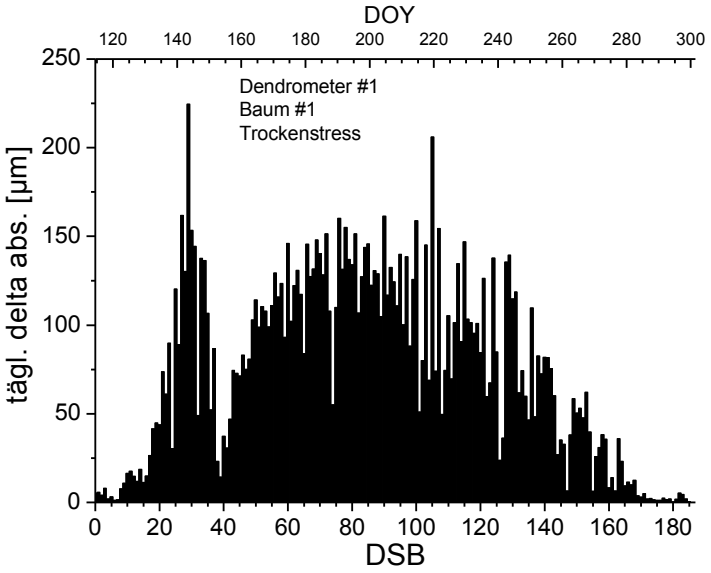

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #11
Baum #37
Trockenstress
tägl. delta rel. [%]
0 1 2 3 4 5 6 7 8
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

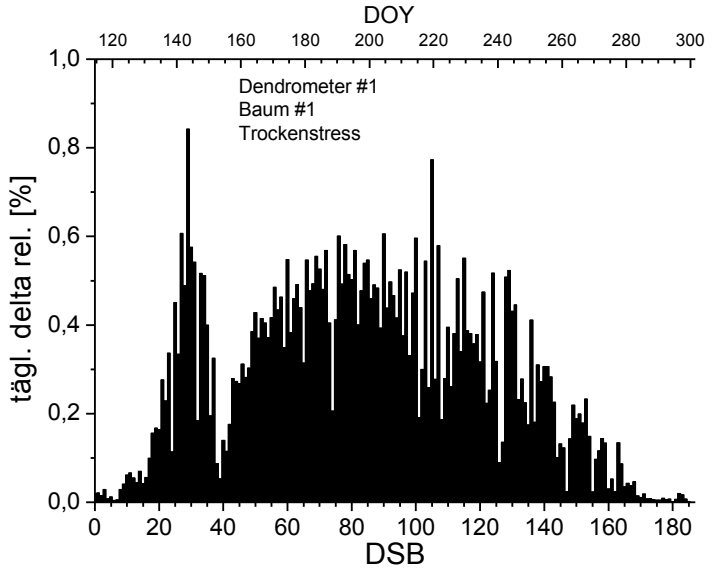

Dendrometer #9
Baum #24
Trockenstress
Stammdurchmesseränderung [µm]
0 500 1000 1500 2000 2500
Nov. 05 Beginn
11. Mai Ende
100 125 150 175 200 225 250 275 300
DOY

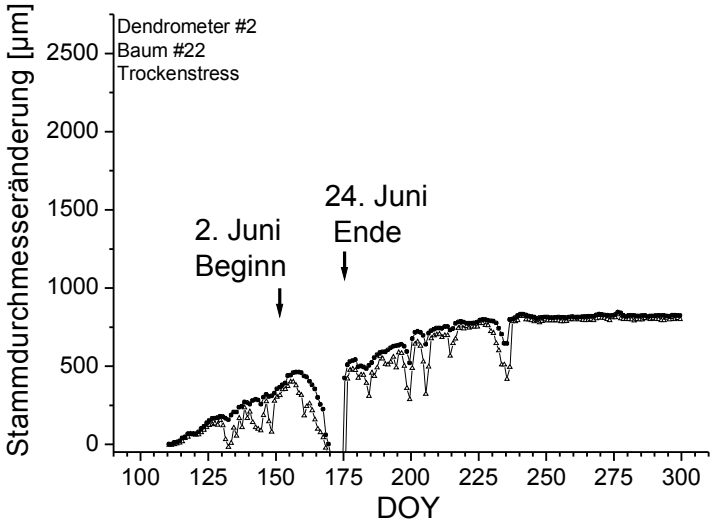

DOY
140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #9
Baum #24
Trockenstress
tägl. delta abs. [µm]
0 100 200 300 400 500 600
0 20 40 60 80 100 120 140 160
DSB

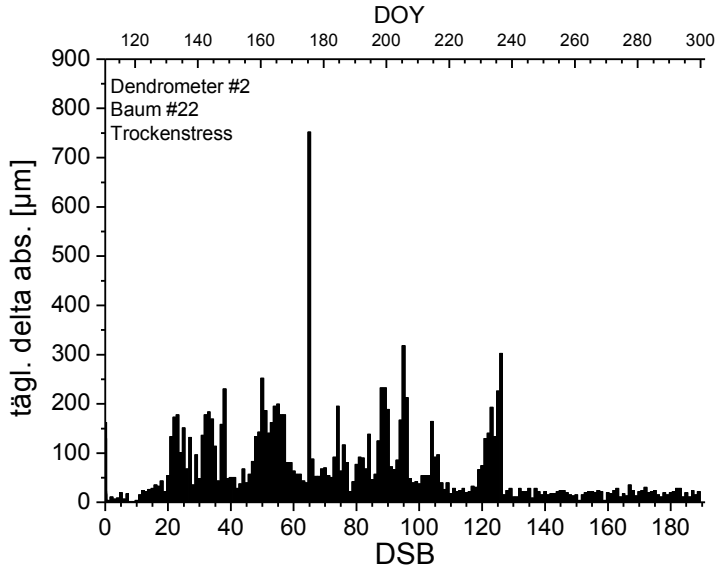

DOY
140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #9
Baum #24
Trockenstress
tägl. delta rel. [%]
0 1 2 3 4 5
0 20 40 60 80 100 120 140 160
DSB

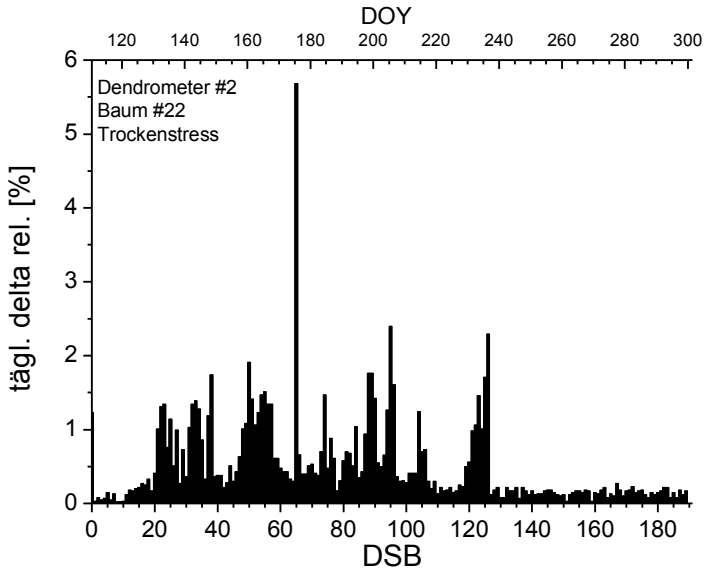

Dendrometer #1
Baum #1
Trockenstress
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500
2000
1500
1000
500
0
Nov. 05 Beginn
31. Mai Ende
100
125
150
175
200
225
250
275
300
DOY

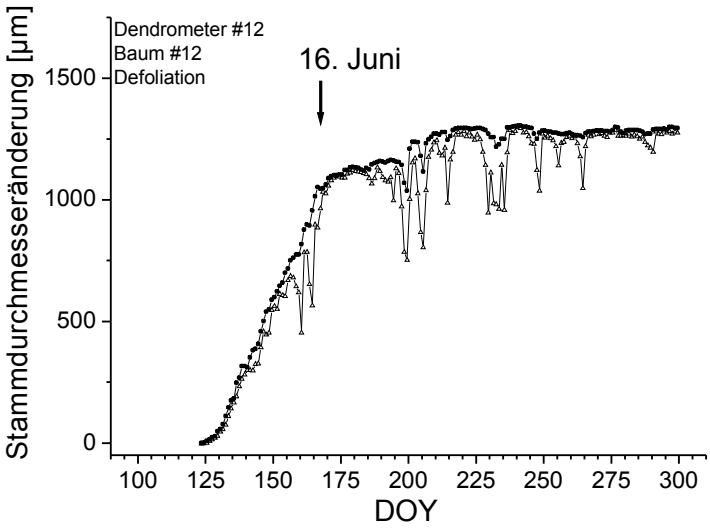

DOY
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Dendrometer #1
Baum #1
Trockenstress
tägl. delta abs. [µm]
250
200
150
100
50
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
DSB

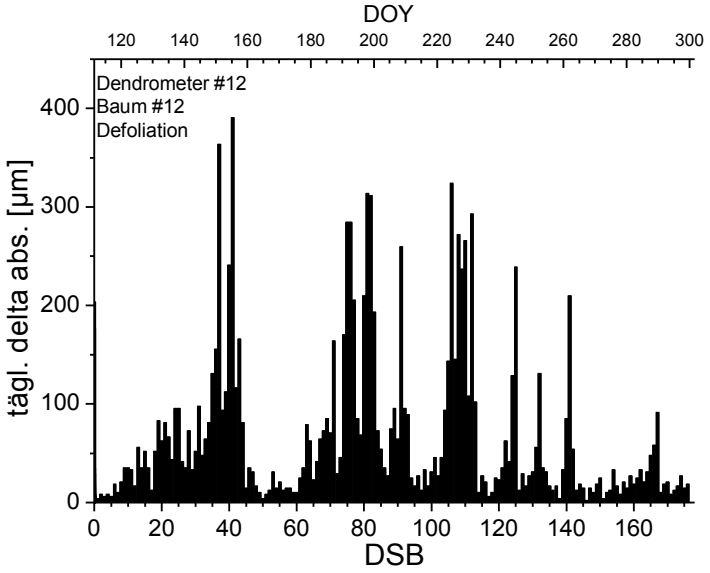

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #1
Baum #1
Trockenstress
tägl. delta rel. [%]
1,0 0,8 0,6 0,4 0,2 0,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

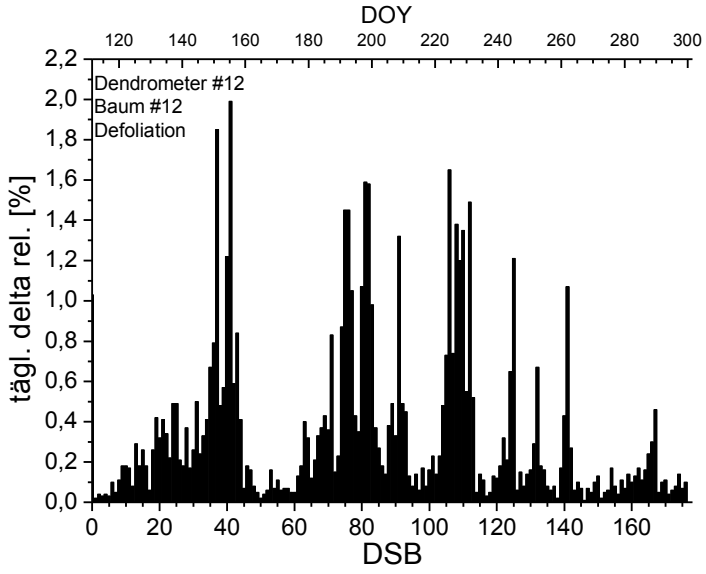

Dendrometer #2
Baum #22
Trockenstress
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500 2000 1500 1000 500 0
2. Juni
Beginn
24. Juni
Ende
100 125 150 175 200 225 250 275 300
DOY

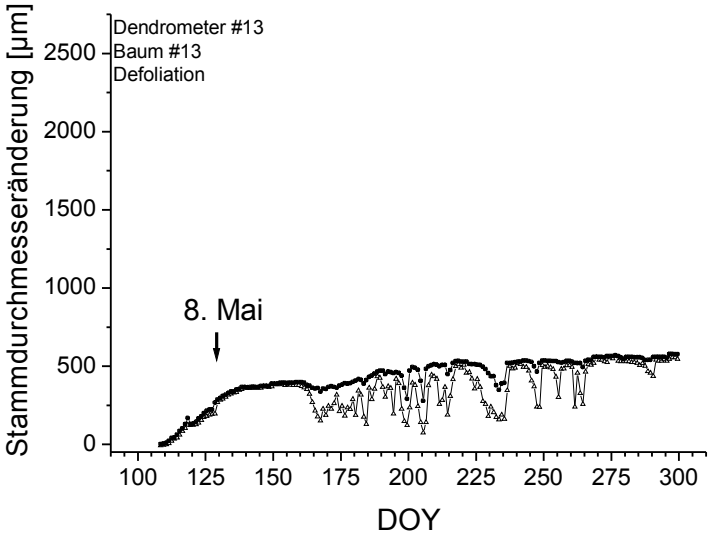

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #2
Baum #22
Trockenstress
tägl. delta abs. [µm]
0 100 200 300 400 500 600 700 800 900
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

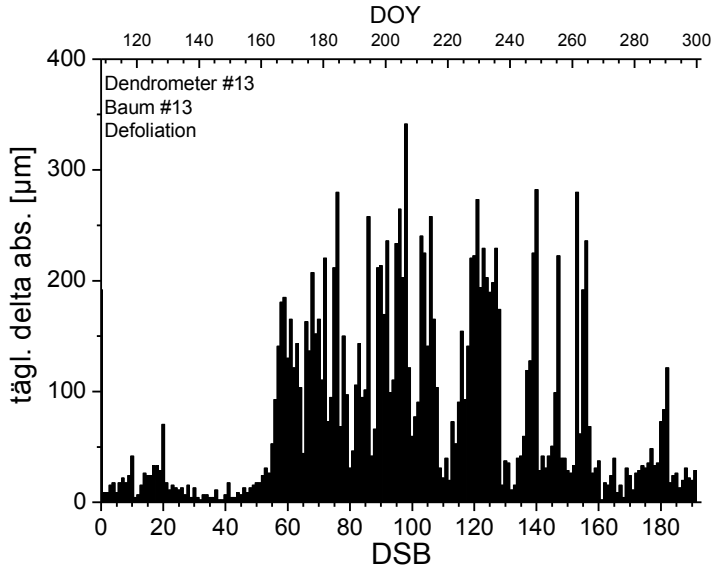

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #2
Baum #22
Trockenstress
tägl. delta rel. [%]
0 1 2 3 4 5 6
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

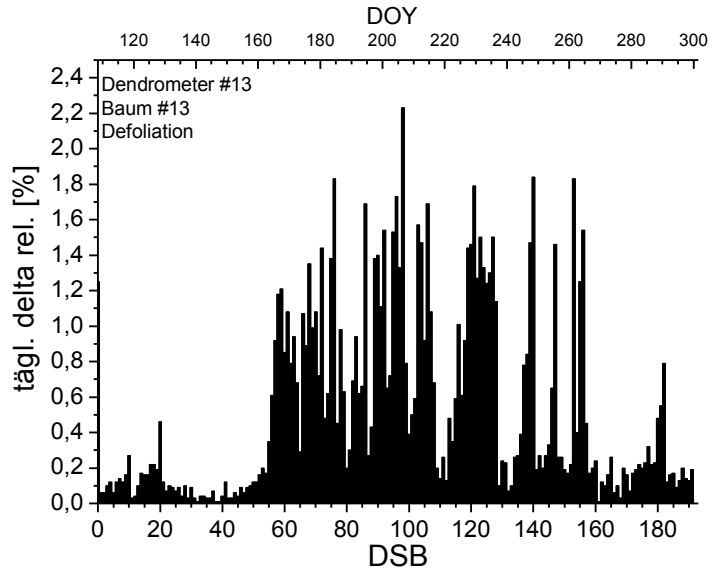

Dendrometer #12
Baum #12
Defoliation
16. Juni
Stammdurchmesseränderung [µm]
1500
1000
500
0
100
125
150
175
200
225
250
275
300
DOY

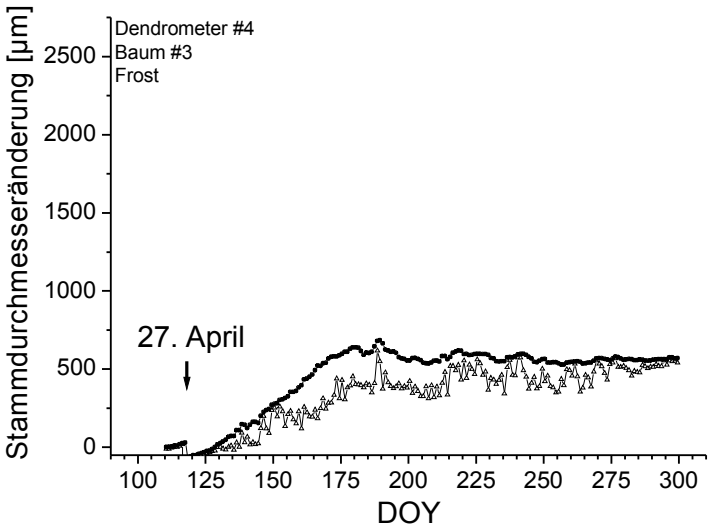

DOY
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Dendrometer #12
Baum #12
Defoliation
tägl. delta abs. [µm]
400
300
200
100
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
DSB

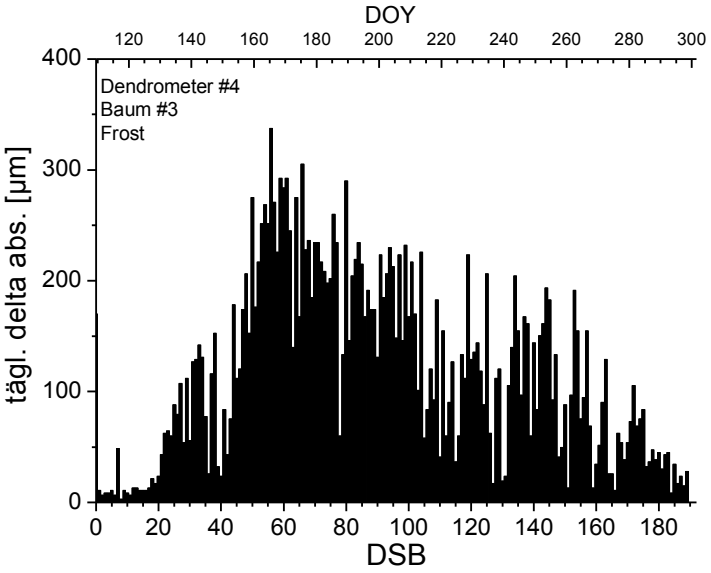

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #12
Baum #12
Defoliation
tägl. delta rel. [%]
2,2 2,0 1,8 1,6 1,4 1,2 1,0 0,8 0,6 0,4 0,2 0,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160
DSB

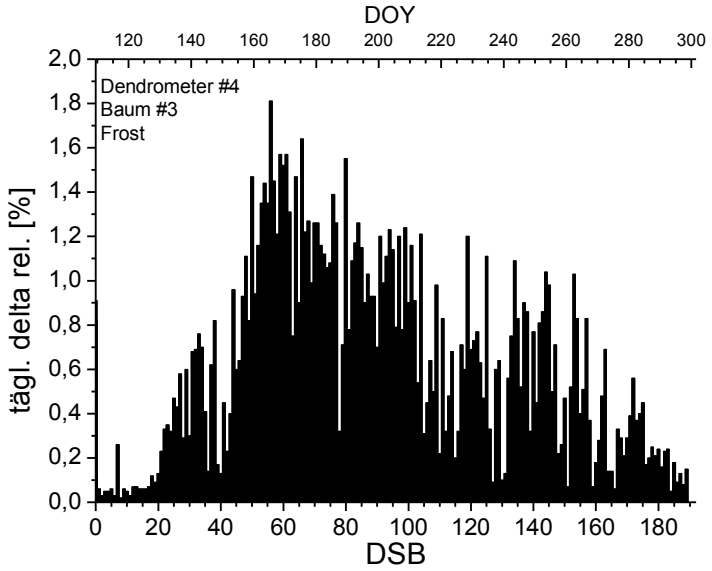

Dendrometer #13
Baum #13
Defoliation
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500 2000 1500 1000 500 0
8. Mai
100 125 150 175 200 225 250 275 300
DOY

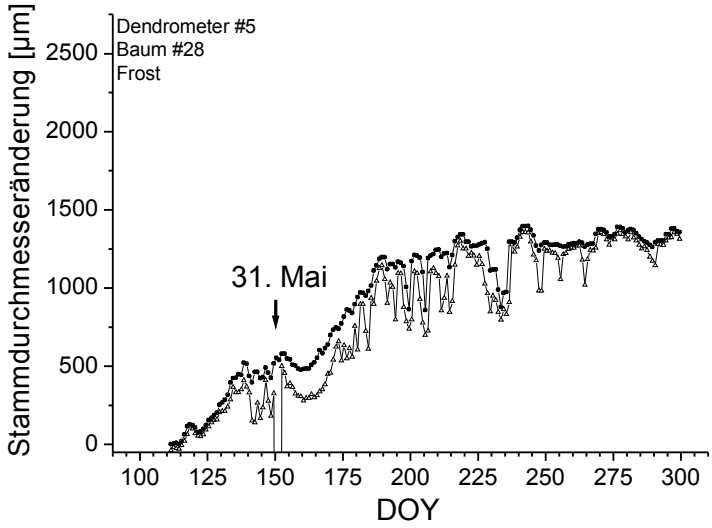

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #13
Baum #13
Defoliation
tägl. delta abs. [µm]
0 100 200 300 400
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

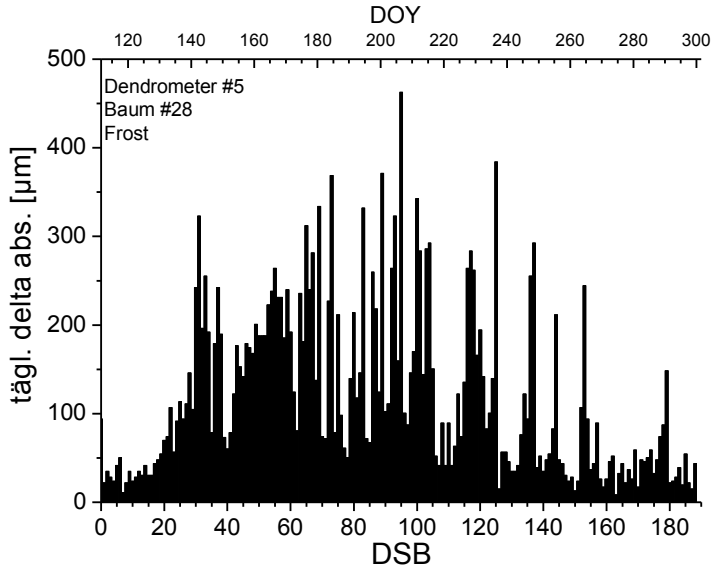

DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #13
Baum #13
Defoliation
tägl. delta rel. [%]
0,0 0,2 0,4 0,6 0,8 1,0 1,2 1,4 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

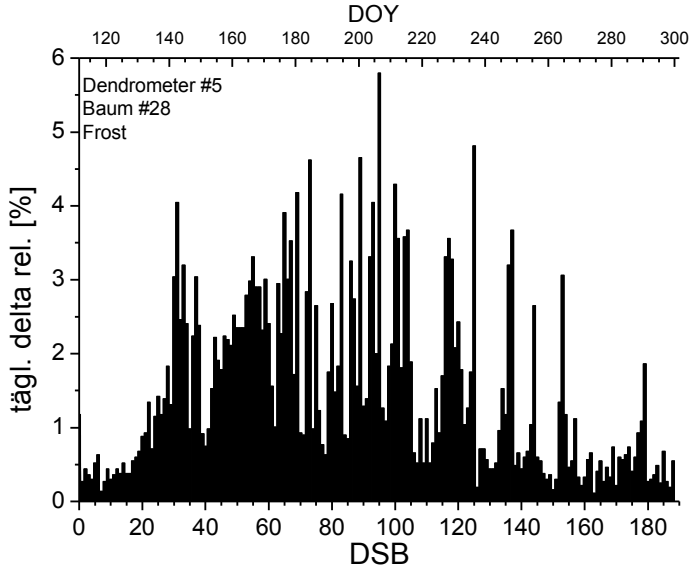

Dendrometer #4
Baum #3
Frost
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500
2000
1500
1000
500
0
27. April
100
125
150
175
200
225
250
275
300
DOY


DOY
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
Dendrometer #4
Baum #3
Frost
tägl. delta abs. [µm]
400
300
200
100
0
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
DSB


DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #4
Baum #3
Frost
tägl. delta rel. [%]
2,0 1,8 1,6 1,4 1,2 1,0 0,8 0,6 0,4 0,2 0,0
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB


Dendrometer #5
Baum #28
Frost
Stammdurchmesseränderung [µm]
2500 2000 1500 1000 500 0
31. Mai
100 125 150 175 200 225 250 275 300
DOY


DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #5
Baum #28
Frost
tägl. delta abs. [µm]
0 100 200 300 400 500
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB


DOY
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300
Dendrometer #5
Baum #28
Frost
tägl. delta rel. [%]
0 1 2 3 4 5 6
0 20 40 60 80 100 120 140 160 180
DSB

Statistische Jahrring-Parameter der Rezent-Studie (berechnet in TSAP)

Nr.	Ort	Kürzel	mittl. Ringbreite [mm/100]											
			RW	Stdv	Max	Min	LW	Stdv	Max	Min	EW	Stdv	Max	Min
1	Baunach	Baun	318	86,4	536	151	253	86,0	467	89	65	12,9	92	32
2	Dettelbach	Dett	202	73,7	447	61	137	61,1	346	20	64	21,3	106	32
3	Escherndorf	Esch	266	107,1	702	80	200	101,7	625	31	66	13,1	115	33
4	Euerheim	Euer	215	65,7	406	102	147	65,0	349	32	67	10,1	106	43
5	Fahr	Fahr	391	108,6	590	124	304	96,5	504	44	86	25,8	136	36
6	Faulbach	Faul	261	103,1	547	38	202	96,9	478	27	58	14,9	85	11
7	Freudenberg	Freu	175	73,4	357	31	133	64,3	292	14	41	11,6	71	16
8	Lampertheim	Lam1	179	73,9	398	74	117	72,8	344	20	62	9,6	98	18
9	Lampertheim	Lam5	105	56,5	297	28	68	55,0	259	6	36	9,7	60	10
10	Lampertheim	Lam8	95	46,9	224	33	56	43,4	177	3	39	8,7	64	11
11	Reutlingen	Reu1	95	24,8	161	42	60	25,2	130	12	35	4,9	46	21
12	Reutlingen	Reu2	84	30,2	202	38	52	28,6	166	10	32	4,5	41	18
13	Reutlingen	Reu3	82	32,6	209	29	50	29,3	159	5	31	5,5	54	23
14	Rust	Rust1	302	86,0	741	98	235	80,6	655	60	66	17,1	92	21
15	Wertheim	Wer1	752	187,6	1189	439	620	187,1	1061	316	131	20,9	172	87
16	Wertheim	Wer2	199	85,3	408	80	135	81,1	343	30	63	11,6	94	9
17	Au am Rhein	Au1	429	129,1	786	197	323	120,0	658	119	105	19,7	153	68
18	Au am Rhein	Au2	285	131,2	831	114	197	118,9	725	45	88	18,8	174	42
19	Au am Rhein	Au3	493	168,4	726	48	427	155,2	661	31	66	23,5	103	17
20	Leimersheim	Leim	254	98,1	672	107	182	93,7	562	48	72	15,0	109	24
21	Oppenheim	Oppe	210	123,2	621	22	151	111,6	535	4	58	15,1	107	18
22	Plieningen	Plie	168	42,7	372	86	113	42,9	314	34	54	9,0	73	28
23	Rust 2006	Rust2	186	59,3	392	46	122	47,2	300	1	64	16,8	100	16
24	Gundremmingen	Fin2	218	68,0	410	105	159	68,9	348	57	58	10,9	81	23
25	Gundremmingen	Fin1	260	74,9	430	111	197	72,7	361	69	62	16,0	89	21
26	Riedlingen	Rie1	228	67,7	617	118	150	55,3	441	58	78	19,7	176	49
27	Riedlingen	Rie2	433	89,9	603	201	340	85,8	504	134	93	18,6	128	39

Nr.	Ort	Kürzel	Autokorrelation RW			Autokorrelation SH			Autokorrelation FH		
			t-1	t-2	t-3	t-1	t-2	t-3	t-1	t-2	t-3
1	Baunach	Baun	0,12	0,12	-0,16	0,04	0,07	-0,14	0,19	-0,07	0,13
2	Dettelbach	Dett	0,4	0,13	0,01	0,3	0,06	0	0,28	0,1	0,15
3	Escherndorf	Esch	0,34	0,04	-0,03	0,27	0	-0,05	0,34	0,14	0,08
4	Euerheim	Euer	0,27	-0,07	-0,07	0,21	-0,07	-0,05	0,13	0,04	-0,06
5	Fahr	Fahr	0,27	0,08	0	0,22	0,05	0,03	0,29	0,1	-0,21
6	Faulbach	Faul	0,42	-0,04	0	0,38	-0,1	-0,02	0,23	0,08	0,01
7	Freudenberg	Freu	0,4	0,16	-0,07	0,34	0,15	-0,08	0,21	0,09	-0,03
8	Lampertheim	Lam1	0,21	-0,15	-0,06	0,09	-0,17	-0,1	0,06	-0,04	-0,02
9	Lampertheim	Lam5	0,25	-0,12	-0,2	0,23	-0,13	-0,18	0	0,02	-0,1
10	Lampertheim	Lam8	0,27	-0,11	-0,17	0,23	-0,1	-0,17	0,1	0,01	-0,07
11	Reutlingen	Reu1	0,12	0,17	-0,06	0,04	0,16	-0,02	0,09	0,01	-0,12
12	Reutlingen	Reu2	0,07	0,09	-0,04	0,02	0,08	-0,05	0,14	0,05	-0,01
13	Reutlingen	Reu3	0,15	0,01	-0,15	0,13	0	-0,19	0,14	0,07	0,05
14	Rust	Rust1	0,33	0,02	0,09	0,29	-0,02	0,08	0,32	0,05	0,09
15	Wertheim	Wer1	0,47	0,22	0,17	0,43	0,22	0,17	0,16	0,13	-0,27
16	Wertheim	Wer2	0,23	-0,12	-0,12	0,15	-0,15	-0,13	0,27	0,1	0,04
17	Au am Rhein	Au1	0,27	0,18	0,1	0,14	0,18	0,08	0,02	0,31	-0,15
18	Au am Rhein	Au2	0,41	0,14	0,02	0,25	0,1	0,04	0,13	0,15	0,03
19	Au am Rhein	Au3	0,61	0,25	0	0,59	0,25	0	0,46	0,09	0
20	Leimersheim	Leim	0,21	-0,16	0,01	0,15	-0,16	0,02	0,21	0,02	0,05
21	Oppenheim	Oppe	0,36	-0,03	0,11	0,28	-0,11	0,13	0,42	0,27	0,14
22	Plieningen	Plie	0,2	0,05	0,15	0,1	0	0,18	0,34	0,1	0,12
23	Rust 2006	Rust2	0,48	0,11	0,1	0,5	0,13	0,04	0,4	0,14	0,14
24	Gundremmingen	Fin2	0,21	0,07	-0,16	0,15	0,04	-0,17	0,04	0,11	0,02
25	Gundremmingen	Fin1	0,5	0,19	-0,08	0,44	0,18	-0,09	0,19	0,19	-0,02
26	Riedlingen	Rie1	0,29	0,09	0,01	0,19	0,05	-0,01	0,34	0,09	-0,05
27	Riedlingen	Rie2	0,1	-0,3	-0,05	0,04	-0,36	-0,04	0,17	0,01	0,03

Nr.	Ort	Kürzel	GLK			WGL			VAR			Stdv		
			RW	LW	EW	RW	LW	EW	RW	LW	EW	RW	LW	EW
1	Baunach	Baun	68	69	65	75	76	74	3467	3256	74	58,9	57,1	8,6
2	Dettelbach	Dett	79	79	67	82	82	69	2263	1949	68	47,6	44,2	8,2
3	Escherndorf	Esch	65	65	58	81	81	72	5194	4461	105	72,1	66,8	10,2
4	Euerheim	Euer	74	76	72	81	83	78	2978	2764	70	54,6	52,6	8,3
5	Fahr	Fahr	33	32	27	77	74	62	8245	7268	202	90,8	85,3	14,2
6	Faulbach	Faul	61	61	56	82	82	75	5376	4880	83	73,3	69,9	9,1
7	Freudenberg	Freu	69	69	63	78	78	71	1959	1790	27	44,3	42,3	5,2
8	Lampertheim	Lam1	72	74	67	77	80	72	962	955	63	31	30,7	8
9	Lampertheim	Lam5	66	65	57	75	74	66	790	747	12	28,1	27,3	3,5
10	Lampertheim	Lam8	77	75	72	82	79	76	506	448	22	22,5	21,2	4,6
11	Reutlingen	Reu1	80	80	65	82	83	67	338	299	11	18,4	17,3	3,3
12	Reutlingen	Reu2	75	75	58	82	82	63	307	275	6	17,5	16,6	2,4
13	Reutlingen	Reu3	57	57	45	81	81	64	317	275	12	17,8	16,6	3,5
14	Rust	Rust1	72	73	64	76	77	68	4525	4224	57	67,3	65	7,6
15	Wertheim	Wer1	60	57	61	78	75	80	13933	12096	300	118	110	17,3
16	Wertheim	Wer2	79	81	73	81	83	75	1949	1742	63	44,1	41,7	7,6
17	Au am Rhein	Au1	51	53	45	78	81	70	8088	7261	225	89,9	85,2	15
18	Au am Rhein	Au2	69	71	68	76	78	75	4802	4272	178	69,3	65,4	13,3
19	Au am Rhein	Au3	54	52	47	81	79	70	20639	18520	126	143,7	136,1	11,2
20	Leimersheim	Leim	71	71	63	78	78	69	4599	4256	54	67,8	65,2	7,3
21	Oppenheim	Oppe	61	62	53	75	76	65	2133	1786	57	46,2	42,3	7,6
22	Plieningen	Plie	78	79	66	78	80	67	1153	1029	29	34	32,1	5,4
23	Rust 2006	Rust2	75	71	68	76	73	69	1698	1197	55	41,2	34,6	7,4
24	Gundremmingen	Fin2	78	78	70	81	81	72	1528	1530	37	39,1	39,1	6,1
25	Gundremmingen	Fin1	66	66	61	77	77	70	2639	2370	48	51,4	48,7	6,9
26	Riedlingen	Rie1	70	70	66	77	77	73	2158	1826	104	46,5	42,7	10,2
27	Riedlingen	Rie2	72	70	64	85	82	75	5115	5181	121	71,5	72	11

Nr.	Ort	Kürzel	RMS			TC%			Güte % (75-99%)		
			RW	LW	EW	RW	LW	EW	RW	LW	EW
1	Baunach	Baun	54	57	51	65	69	69	24	24	19
2	Dettelbach	Dett	44	48	43	63	64	67	32	33	13
3	Escherndorf	Esch	44	45	43	68	65	66	35	36	25
4	Euerheim	Euer	48	50	53	56	59	71	35	38	24
5	Fahr	Fahr	45	47	48	57	57	61	5	23	27
6	Faulbach	Faul	41	43	48	60	59	68	33	33	18
7	Freudenberg	Freu	38	40	48	60	57	64	29	32	14
8	Lampertheim	Lam1	43	46	47	59	63	67	20	26	14
9	Lampertheim	Lam5	42	41	55	60	62	78	27	27	9
10	Lampertheim	Lam8	41	40	51	60	65	78	45	X	35
11	Reutlingen	Reu1	52	54	51	66	70	72	31	33	12
12	Reutlingen	Reu2	49	50	51	72	72	75	35	39	12
13	Reutlingen	Reu3	49	50	45	69	69	73	25	30	9
14	Rust	Rust1	42	44	45	63	67	72	24	24	9
15	Wertheim	Wer1	39	40	53	52	57	76	17	17	27
16	Wertheim	Wer2	44	47	46	59	60	67	36	42	20
17	Au am Rhein	Au1	46	49	46	71	74	74	33	33	26
18	Au am Rhein	Au2	38	42	45	57	60	59	34	35	24
19	Au am Rhein	Au3	33	34	35	50	50	69	50	33	25
20	Leimersheim	Leim	44	46	50	65	65	67	23	23	13
21	Oppenheim	Oppe	38	41	38	56	64	73	24	27	9
22	Plieningen	Plie	49	52	45	66	67	65	27	28	12
23	Rust 2006	Rust2	37	39	42	56	54	65	22	24	13
24	Gundremmingen	Fin2	49	51	53	69	68	73	29	30	13
25	Gundremmingen	Fin1	41	43	49	58	58	68	21	23	11
26	Riedlingen	Rie1	42	45	42	65	68	64	30	28	21
27	Riedlingen	Rie2	52	53	53	63	66	71	45	52	41

Curriculum vitae

Persönliche Daten

Name	:	Alexander Land
Geburtsdatum	:	12.10.1975
Geburtsort	:	Esslingen/N.
Familienstand	:	Verheiratet, 1 Kind
Nationalität	:	Deutsch

letzte Tätigkeiten

seit 2013	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Botanik der Universität Hohenheim
2010-2013	Lehrkraft an der BiL-Privatschule, Stuttgart (Bad-Cannstatt) Lehrbefähigung für die Fächer Biologie, Chemie, Naturwissenschaft und Technik (NWT) am Gymnasium (Regierungspräsidium Stuttgart)

Projekte

2007-2010	Wissenschaftlicher Mitarbeiter im DFG-Schwerpunktprogramm 1266 'Integrated Analysis of Interglacial Climate Dynamics' (INTERDYNAMIK); Projekt 'Variation of precipitation and flood dynamics in Central Europe during the Holocene on the basis of dendrochronological and documentary data' (HOLOFLOOD)

Doktorarbeit

2004-2014	Doktorarbeit am Institut für Botanik der Universität Hohenheim

Stipendium / Auslandsaufenthalt

2005-2006	6-monatiges Stipendium und Aufenthalt am Institute of Forest Ecology and Forest Management (FEM), Wageningen University, The Netherlands (Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ute Sass-Klaassen)

Studium

2002-2003	Diplomarbeit am Institut für Botanik der Universität Hohenheim Titel: “Über den Einfluss von Standort und Klima auf den Früh- und Spätholz-Zuwachs rezenter Eichen“
2000-2003	Hauptstudium der Biologie an der Universität Hohenheim Vertiefungsfächer: Botanik, Pflanzenphysiologie, Biochemie, Tierökologie
1998-2000	Grundstudium der Biologie an der Universität Hohenheim

Fort- / Weiterbildungen

2014	Erwerb des „Baden-Württemberg-Zertifikat für Hochschuldidaktik“
2009	'Presentation Skills for Life' (Präsentations-Workshop)
2006-2009	Japanisch I-VI (Endlevel B1, Sprachenzentrum Uni-Hohenheim)

Schulische Ausbildung

1996-1998	Käthe-Kollwitz-Schule Esslingen/Zell
1995-1996	Bundeswehr
1993-1994	Käthe-Kollwitz-Schule Esslingen/Zell
1988-1993	Realschule Plochingen
1987-1988	Burgschule Plochingen
1982-1987	Neckarschule Plochingen

Erklärung

UNIVERSITÄT HOHENHEIM

Eidesstattliche Versicherung gemäß § 7 Absatz 7 der Promotionsordnung der Universität Hohenheim zum Dr. rer. nat.

1. Bei der eingereichten Dissertation zum Thema

„Holzanatomische Veränderungen als Reaktion auf extreme Umweltereignisse in rezenten und subfossilen Eichen und deren Verifizierung im Experiment“

handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.

2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner unzulässigen Hilfe Dritter bedient. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht.

3. Ich habe nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsvermittlung oder -beratung in Anspruch genommen.

4. Die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und der strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung sind mir bekannt.

Die Richtigkeit der vorstehenden Erklärung bestätige ich. Ich versichere an Eides Statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erklärt und nichts verschwiegen habe.

Stuttgart-Hohenheim, Oktober 2014

Dipl.-Biol. Alexander Land