

**Zuwachs und Konkurrenz in Buchen-/Eichenmischbeständen unter sich
ändernden Klimabedingungen**

**Inaugural-Dissertation zur
Erlangung der Doktorwürde
der Fakultät für Umwelt und
Natürliche Ressourcen der
Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg i. Brsg.**

vorgelegt von

Arno Mattes

Freiburg im Breisgau

2014

Dekan: Prof. Dr. Tim Freytag

Referent: Prof. Dr. Dr. h.c. Heinrich Spiecker

Korreferent: PD Dr. Klaus von Wilpert

Datum der mündlichen Prüfung: 6. Februar 2015

Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung vieler Menschen nicht möglich gewesen. Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Heinrich Spiecker für die gewährte Möglichkeit aus dem „normalen“ Berufsleben *aus-* und ins Wissenschaftsleben *ein*zusteigen bedanken. Ich habe mich an der Professur für Waldwachstum wohl gefühlt und die anregenden und manchmal auch kontroversen Diskussionen mit Ihnen werden mich ein Leben lang begleiten.

Mein zweiter Dank geht an die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt und Ihren Direktor Herrn Professor Konstantin von Teuffel. Die finanzielle und technische Unterstützung meines Forschungsvorhabens hat die Aufnahme meiner Tätigkeit am IWW erst ermöglicht. Einschließen möchte ich in diesen Dank die Unterstützung durch die Abteilungen Waldwachstum, Waldnaturschutz, sowie Boden und Umwelt. Prof. Dr. Ulrich Kohnle als Leiter der Abteilung Waldwachstum hat die Arbeit inhaltlich betreut, ihm und seinem Mitarbeitern Dr. Axel Albrecht für die fachliche Beratung herzlichen Dank. Dem Leiter der Abteilung Waldnaturschutz, Dr. Eberhard Aldinger, für die Aufnahme meiner Eichenproben im genetischen Labor der Abteilung und Dr. Charalambos Neophytou für die Analyse dieser Proben, sowie Dr. Hans-Gerhard Michiels für die Beratungen zur Pflanzensoziologie zu Beginn der Arbeit gilt ebenfalls mein Dank. Schließlich hat mich die Abteilung Boden und Umwelt bei der Aufstellung des Bodenwasserhaushaltmodells und bei der Erhebung der bodenkundlichen Eingangsparmeter für dasselbe beraten und unterstützt. Hierfür möchte ich mich beim Leiter der Abteilung PD Dr. Klaus von Wilpert, der freundlicherweise auch das Korreferat für diese Arbeit übernommen hat, und bei seinen Mitarbeitern Dr. Heike Puhlmann und Hermann Buberl vielmals bedanken.

Ein weiterer Dank geht an die Landesforstverwaltung von Baden-Württemberg – ForstBW. Trotz Personalknappheit wurde es mir im Rahmen einer befristeten Versetzung ermöglicht meinen Forschungsdrang auszuleben. Ich hoffe, ich kann mein in den letzten fünf Jahren erworbenes Wissen in gewinnbringender Weise zukünftig in der forstlichen Verwaltung einsetzen.

Ein großes Dankeschön geht an alle Kollegen hier am IWW – allen voran möchte ich Herrn Dr. Hans-Peter Kahle nennen. Er hat mich vielfach beraten, mir neue Ideen zu weiteren Auswertungsmöglichkeiten in den Kopf gesetzt und mich auf verschiedenste statistische Fallstricke aufmerksam gemacht. Des Weiteren möchte ich mich bei den KollegInnen die sich mit ähnlichen Fragestellungen am IWW beschäftigen und mir bei Bedarf mit Rat und Tat zur Seite standen bedanken, namentlich erwähnt werden sollen Bela Bender, Simon Boden, Jan Hackenberg, Dr. Christopher Morhart, David Montwé, Jon Sheppard, Simeon Springmann, Dominik Stangler, Dr. Johanna Storch, Dr. Willy Tegel, Dr. Ernst van der Maaten, Dr. Marieke van der Maaten-Theunissen, Marc Wassenberg, sowie die Mitarbeiter von Labor und Technik Felix Baab, Clemens Koch und Olaf Grobbel und aus dem Sekretariat Isabella Katz und Katharina Hänsel.

Ohne die Unterstützung der Revierleiter vor Ort wäre diese Arbeit schon an der Probengewinnung gescheitert – ich bedanke mich also bei den Herren Achim Bolley (Revier: Buggingen-Neuenburg), Michael Karle (Revier: Glottertal), Fritz Lippoth (Revier: Sternenfels), Jochen Rüb (Revier: Stromberg), Peter Schmiederer (Revier: Allerheiligen) und Otmar Winterhalder (Revier: Dreisamtal), sowie bei deren mich unterstützenden Forstwirten und Vorgesetzten.

Die stehende Vermessung der Untersuchungsbäume, die Probengewinnung, die Anlage von Bodenprofilen, die Vermessung von Stammscheiben – das alles sind Tätigkeiten deren zeitlichen Umfang man zu Beginn eines solchen Projektes leicht unterschätzt. Ohne die Hilfe zahlreicher studentischer Hilfskräfte wären die Arbeiten heute noch nicht beendet. Stellvertretend sei an dieser Stelle Alexander Braun, Sven Gebhardt, Ulrich Heimberger, Jakob Huber, Jan Kiehne, Benno Künzig, Gregor Seitz, Valentin Stefan, Farina Sooth und Jan-Valentin Wiesmeyer gedankt.

Schließlich möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Familie bedanken. Meine Eltern haben die Arbeit immer wohlwollend unterstützt und vor allem meine Frau Anja Buschle hat mir in den arbeitsreichen Phasen den Rücken freigehalten und sich um unsere Kinder Max und Marie gekümmert. Ich hoffe, wir können nun wieder öfters gemeinsam viele Geheimnisse im Wald entdecken.

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungen	5
Begriffe und Definitionen	6
1 Einleitung	11
1.1 Bedeutung von Konkurrenz zwischen Buche und Eiche aus forstlicher Sicht	11
1.2 Verbreitung und mögliche Klima-Sensitivität von Buchen und Eichen	15
1.3 Für die Konkurrenz zwischen Buchen und Eichen bedeutende Aspekte des Klimawandels	18
1.4 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit	19
2 Stand des Wissens	21
2.1 Unterschiede zwischen Trauben- und Stieleiche	21
2.1.1 Allgemeine Unterschiede	21
2.1.2 Unterschiede hinsichtlich ihrer Verbreitung aufgrund der klimatischen Ansprüche	23
2.1.3 Unterschiede hinsichtlich ihrer Trockenstress-Sensitivität	24
2.2 Die Verläufe von Höhenwachstum und Höhenzuwachs bei Buche und Eiche	28
2.2.1 Höhenwachstumsverlauf bei Buche und Eiche	28
2.2.2 Höhenzuwachs bei Eiche und Buche im Jahresverlauf	29
2.3 Dickenzuwachs bei Buche und Eiche im Jahresverlauf	30
2.3.1 Allgemeine Anmerkungen zur Untersuchungen des intra-annuellen Dickenzuwachses	30
2.3.2 Intra-annueller Dickenzuwachs bei der Buche	30
2.3.3 Intra-annueller Dickenzuwachs bei der Eiche	32
2.3.4 Intra-annueller Dickenzuwachs bei Buche und Eiche im Vergleich	33
2.4 Höhenzuwachs bei Buche und Eiche in Abhängigkeit von Witterung und Trockenstress	33
2.4.1 Allgemeine Zusammenhänge zwischen Höhenzuwachs, Witterung, Baumarten und Alter	33
2.4.2 Höhenzuwachs und Witterung/Trockenstress bei der Buche	34
2.4.3 Höhenzuwachs und Witterung/Trockenstress bei der Eiche	36
2.4.4 Höhenwachstum und Witterung/Trockenstress in Bu-Ei-Mischbeständen bzw. von Buchen und Eichen im Vergleich	38
2.5 Dickenzuwachs bei Buche und Eiche in Abhängigkeit von Witterung und Trockenstress	38
2.5.1 Allgemeine Anmerkungen zum Dickenzuwachs und Witterung/Trockenstress	38
2.5.2 Dickenzuwachs und Witterung/Trockenstress in Bu-Ei-Mischbeständen bzw. im Vergleich	39
2.5.3 Trockenstress-Reaktionen in verschiedenen Stammhöhen	46
2.6 Wachstum und Trockenstress - physiologische Studien	47
2.6.1 Physiologische Studien zu Trockenstress und Wachstum bei der Buche	47
2.6.2 Physiologische Studien zu Trockenstress und Wachstum bei der Eiche	47
2.7 Prognostizierte Auswirkungen des Klimawandels auf die Mortalität und Produktivität von Buchen und Eichen	48
2.8 Fragestellung und Hypothesen der Arbeit	50

3	Material und Methoden	53
3.1	Auswahl des Untersuchungsmaterials	53
3.1.1	Vorüberlegungen und iterativer Prozess zur Auswahl der Untersuchungsbestände	53
3.1.2	Kurzvorstellung der ausgewählten Untersuchungsbestände	55
3.1.3	Auswahl der Untersuchungsbäume für die Analyse des Höhen- und Radialzuwachses	57
3.1.4	Auswahl der Untersuchungsbäume für die genetische Analyse	57
3.1.5	Lage der Bodenprofile und Felderhebung wichtiger Bodenparameter	58
3.2	Angewandte Feldmethoden und Probenentnahmen	58
3.2.1	Aufnahmen am stehenden Baum	58
3.2.2	Aufnahmen am liegenden Baum	59
3.2.3	Probengewinnung für die spätere Bestimmung der Radialzuwächse	59
3.2.4	Probengewinnung für die spätere Bestimmung der Höhenzuwächse	59
3.2.5	Probengewinnung für die genetischen Analysen	60
3.2.6	Bodenaufnahmen und Bodenproben	61
3.3	Angewandte Labormethoden	61
3.3.1	Stamm- und Kronenscheibenpräparation und -vermessung	61
3.3.2	Triebblängenermittlung um das Jahr 2003 und –korrektur anhand der Astproben	63
3.3.3	Stammanalyse zur Höhenzuwachsermittlung	64
3.3.4	Bodenphysikalische Analysen	65
3.3.5	Bodenchemische Analysen	66
3.3.6	Genetische Analysen	66
3.3.7	Eingangsparameter des Bodenwasserhaushaltsmodells	66
3.3.8	Ausgangsparameter des Bodenwasserhaushaltsmodells und abgeleitete Kennzahlen zur Definition von Trockenstress	69
3.4	Statistische Methoden	70
3.4.1	Statistische Methoden zur Analyse der Genetik	70
3.4.2	Statistische Methoden zur Analyse des Höhenwachstums	71
3.4.3	Statistische Methoden zur Analyse des Radialzuwachses	71
3.5	Beschreibung der Standorte im Vergleich	86
3.5.1	Klimatische Verhältnisse an den ausgewählten Standorten im Vergleich	86
3.5.2	Auswertung zu den Bodenprofilen im Vergleich	87
3.5.3	Bodenchemie	89
3.5.4	Bodenwasserhaushalt – Modellierungsergebnisse	90
3.6	Kennzahlen der Untersuchungsbäume	94
3.6.1	Alter, Bestockungsgrad und Bonität	94
3.6.2	Mittlerer Höhenzuwachs und Höhenwachstum	95
3.6.3	Mittlerer Radialzuwachs und Radialzuwachsverlauf	96
3.6.4	Dendrochronologische Kennzahlen	97

4	Ergebnisse	101
4.1	Klimastatistische Analyse der DWD-Daten an den Untersuchungsstandorten	101
4.1.1	Die Trockenjahre 1976 und 2003 im Vergleich zur Klimanormalperiode	101
4.1.2	Die Entwicklung der Witterung seit 1900	102
4.2	Ergebnisse aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell (LWF-BROOK-90)	104
4.2.1	Matrixpotenzialwerte in den Trockenjahren und danach	104
4.2.2	Relatives pflanzenverfügbares Wasser (REW-Werte) in den Trockenjahren	106
4.3	Ergebnisse der genetischen Analyse der Eichen	106
4.3.1	Artzugehörigkeit	106
4.3.2	Eiszeitliches Refugialgebiet	107
4.4	Ergebnisse zum Höhenzuwachs und Höhenwachstum	108
4.4.1	Trockenstress-Reaktionen im Höhenzuwachs	108
4.4.2	Trockenstress-Reaktionen im Höhenwachstum	110
4.5	Ergebnisse zum Radialzuwachs	112
4.5.1	Radialzuwachsserien von Buchen und Eichen im Vergleich	112
4.5.2	Darstellung der Radialzuwachsserien in unterschiedlichen Stammhöhen	115
4.5.3	Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse für die Radialzuwächse auf 1.3 m Höhe	116
4.5.4	Quotienten der trendbereinigten Radialzuwachsserien	118
4.6	Witterung-Wachstumsbeziehungen im Radialzuwachs	119
4.6.1	Response functions mit Monatswerten	119
4.6.2	Korrelationen mit Tageswerten	121
4.7	Trockenstress-Reaktion des Radialzuwachses	124
4.7.1	Trockenstresskennzahlen in den beiden Trockenjahren	124
4.7.2	Trockenstresskennzahlen in den beiden Alterskollektiven	124
4.7.3	Trockenstresskennzahlen an allen Untersuchungsstandorten	125
4.7.4	Trockenstresskennzahlen in verschiedenen Stammhöhen	126
4.7.5	Trockenstresskennzahlen entlang des Wasserverfügbarkeitsgradienten	127
5	Diskussion	131
5.1	Diskussion des Materials	131
5.1.1	Diskussion der Auswahl der Untersuchungsbestände und der Untersuchungsbäume	131
5.1.2	Diskussion zur Anzahl der Untersuchungsbäume	135
5.1.3	Diskussion zur Eignung der Bestände vor dem Hintergrund der klimastatistischen Analysen	136
5.1.4	Diskussion der Eignung der Bestände vor dem Hintergrund der genetische Variabilität	137
5.2	Diskussion der Methoden	138
5.2.1	Diskussion der Ermittlung des Höhenwachstums und des Höhenzuwachses	138
5.2.2	Diskussion der Ermittlung des Radialzuwachses	139

5.2.3	Diskussion der Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells	140
5.2.4	Diskussion zum Konzept der Witterungs-Wachstumsbeziehungen	141
5.2.5	Diskussion zum Konzept der Trockenstresskennzahlen	142
5.3	Diskussion der Ergebnisse	143
5.3.1	Diskussion der Ergebnisse zum Höhenzuwachs und Höhenwachstum	143
5.3.2	Diskussion der Ergebnisse zum Radialzuwachs	145
5.4	Diskussion weiterer Aspekte, die Trockenstress-Toleranz und Witterungs-Sensitivität beeinflussen	162
5.5	Diskussion des praktischen Nutzens der Ergebnisse für die Forstwirtschaft	163
5.5.1	Zukünftige Anbaueignung von Buchen und Eichen	164
5.5.2	Trockenstressreaktion in Bu-Ei-Mischbeständen versus Reinbeständen	164
5.5.3	Verlängerung der Umtriebszeiten von Buchen und Eichen	165
6	Ausblick und weitere Forschungsfragen	167
7	Zusammenfassung	169
8	Summary	173
9	Literatur	177
	Tabellenverzeichnis	195
	Abbildungsverzeichnis	197
	Verzeichnis der Anhänge	201

Abkürzungen

AK1	Autokorrelation mit lag 1
Ant.	Antonym
AT	Untersuchungsstandort Attental (Altbestand, Südhang am Westabfall des Schwarzwaldes)
BA	Baumart
BHD	Brusthöhendurchmesser
BWI I	erste Bundeswaldinventur, die Erhebungen dazu wurden in den Jahren 1987 bis 1989 durchgeführt
BWI II	zweite Bundeswaldinventur, die Erhebungen dazu wurden in den Jahren 2001 und 2002 durchgeführt
Bu	Buche
BP	Bodenprofil
C _{org}	organischer Kohlenstoff
CL-SWA 50	critical limits of soil water availability: Kritischer Druck der Bodenmatrix, bei dem analog zum PLC50-Wert, 50% der Xylemleitfähigkeit einer Baumart verloren geht.
DWD	Deutscher Wetterdienst
Ei	Eiche
EPS	Expressed population signal
ET	Ertragstafel
HW	Untersuchungsstandort Heuweiler (Jungbestand, Nordhang am Westabfall des Schwarzwaldes)
ISK	Interserienkorrelation
LN	Untersuchungsstandort Leonbronn (Jungbestand, Nordhang im Stromberg)
LT	Untersuchungsstandort Lautenbach (Altbestand, Nordhang am Westabfall des Schwarzwaldes)
MSL	mittlere Serienlänge, d.h. die Anzahl der Jahrringe auf einem Bohrkern
nFK _{WE}	nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum
paV	potenzielle aktuelle Verbreitung
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PLC50	percent loss conductivity: Der Druck, bei dem 50 % der vaskulären Leitfähigkeit des Xylems verloren gehen; der PLC10-Wert bezeichnet demnach den 10%igen Verlust der Xylemleitfähigkeit, der PLC90-Wert den 90%igen Verlust.
PTF	Pedotransferfunktionen
PWP	permanenter Welkepunkt
QREG	Abkürzung für das Interreg-IV-Projekt: Die Verjüngung der Eiche im oberrheinischen Tiefland (http://quercus-regeneration.eu/ger/index.html)
REW	relative extractable water (= relative Bodenfeuchte)
SEi	Stieleiche (<i>Quercus robur</i>)
SN	Untersuchungsstandort Sternenfels Nordhang (Altbestand, Nordhang im Stromberg)
SPI	Standardized Precipitation Index
SU	Untersuchungsstandort Sulzburg (Jungbestand, Südhang am Westabfall des Schwarzwaldes)
SS	Untersuchungsstandort Sternenfels Südhang (Altbestand, Südhang im Stromberg)
STO-BA-Kombination	Standort-Baumarten-Kombination, d.h. die Berücksichtigung nur einer Baumart an einem Untersuchungsstandort
SP	Untersuchungsstandort Spielberg (Jungbestand, Südhang im Stromberg)
Syn.	Synonym
TEi	Traubeneiche (<i>Quercus petraea</i>)

Begriffe und Definitionen

Aridität, vgl. Trockenheit	Unter ariden Landschaften stellen wir uns Wüsten, Dünen oder Landschaften die durch xeromorphe Pflanzen (z.B. Kakteen) geprägt sind vor. Die Aridität und ihr Gegenpart die Humidität bezeichnen dagegen die generelle Wasserversorgung von Standorten auf der Grundlage der potenziellen und aktuellen → Evapotranspiration und/oder dem Niederschlag, bzw. der Temperatur. Diese Größen werden verwendet um → Ariditätsindices zu berechnen (MALIVA, MISSIMER 2012).
Ariditäts-Index	Eine Kennzahl um das Ausmaß der Aridität für eine bestimmte Region zu charakterisieren, bekannte Indices wurden entwickelt von: <ul style="list-style-type: none"> • der UNESCO (1979): AI = Jahresniederschlagssumme/potenzielle Evapotranspiration • DE MARTONNE (1926): Am = Jahresniederschlagssumme/(Jahresdurchschnittstemperatur + 10) • THORNTHWAITE (1948) (im Anhalt an MALIVA, MISSIMER 2012)
Bodenart	Unter Bodenart wird die Korngrößenverteilung des Feinbodens verstanden. Dabei werden die Anteile an Ton, Sand und Schluff ermittelt, wobei „insgesamt 21 verschiedene Gruppen vom Reinsand (Ss) bis zum tonigen Ton (Tt) unterschieden [werden].“ (SCHEFFER ET AL. 2010, 174).
Dürre; Syn. Trockenheit	Ein extremer, länger herrschender Zustand, in dem aus land- und forstwirtschaftlicher Sicht weniger Wasser verfügbar ist als erforderlich, d.h. der Wasserbedarf von Pflanzen ist in dieser Definition eingeschlossen (im Anhalt an CLIMATE SERVICE CENTER GERMANY). Im Rahmen der vorliegenden, waldwachstumskundlichen Arbeit werden die Begriffe → Trockenheit und Dürre synonym verwendet.
Dürresistenz; Syn. Trockenstresstoleranz	Fähigkeit von Pflanzen/Bäumen eine → Trockenperiode ohne langfristige Auswirkungen auf ihren „normalen“ Zuwachsverlauf zu überstehen. Der zweite Wortteil „resistenz“ wird hier also nicht im Sinne der Definition von → „Resistenz“ (Zuwachseinbruch) verwendet.
Evaporation; Syn. „unproduktive Verdunstung“	Verdunstung von Wasser sowohl von den Pflanzenoberflächen (=Interzeption), als auch von den Wasser- und Bodenoberflächen. Im Gegensatz zur Transpiration sind keine Atmungsvorgänge betroffen.
Evapotranspiration, (potenzielle)	Die Summe aus → Transpiration und → Evaporation. Die → Evapotranspiration in Buchenbeständen schwankt nach einer Literaturrecherche von PECK UND MAYER (1996) zwischen 396 und 937mm/Jahr (Mittel aus neun analysierten Quellen: 561mm/Jahr) in Eichenbeständen zwischen 309 und 585mm/Jahr (Mittel aus sieben analysierten Quellen: 450mm/Jahr). Als „potenzielle Evapotranspiration“ für einen Standort gibt an, welche Verdunstungsrate bei ständig voller Wasserversorgung möglich gewesen wäre.
Feldkapazität, nutzbare; Syn. Wasserspeicherkapazität, nutzbare	Maß für die Fähigkeit des Bodens an einem bestimmten Standort Wasser zu speichern, welches von den Pflanzen/Bäumen genutzt werden kann. Dieses ist im → Saugspannungsbereich zwischen pF 1.8 bis pF 4.2 der Fall (im Anhalt an ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996), vgl. Kapitel: 3.3.7).
Indexserie, Syn. trendbereinigte Radialzuwachsreihe; Syn. Radialzuwachs-Indexserie	Durch die einzelbaumweise Trendbereinigung (vgl. Kapitel 3.4.3.2) entstehen dimensionslose Zeitreihen mit sogenannten „Indexwerten“. Analog zu den → Radialzuwachsreihen, wurde in der vorliegenden Arbeit ein arithmetische Mittel aus den fünf Zeitreihen der Indexwerte (pro Standort und Baumart fünf Bäume) gebildet. Diese mittlere Zeitreihe der Indexwerte wird als Indexserie bezeichnet.

Introgression	Durch Kreuzung zweier Arten erfolgt zunächst eine Hybridbildung. Durch die Rückkreuzung der Hybride mit einem Elternteil können Genomteile von einer Art in die andere überführt werden. Diese zwischenartliche Genwanderung nennt man Introgression (im Anhalt an UNIVERSITÄT HAMBURG 2004)
Klima vgl. Wetter; vgl. Witterung;	Die zusammengefassten Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem Gebiet charakterisieren. Zur Beschreibung des Klimas werden Zeitreihen mit Mittelwerten, Extremwerten, Häufigkeiten, etc. über einen Zeitraum von i.d.R. 30 Jahren ausgewertet (im Anhalt an: DEUTSCHER WETTERDIENST 30.05.2014)
Klima-Sensitivität	Empfindlichkeit von Baumarten in ihrer Zuwachsreaktion oder gegenüber biotischen und abiotischen Schadfaktoren, wenn es zu langfristigen → Klimaveränderungen kommt. Aufgrund der Verbreitung der Baumart können erste Rückschlüsse zur Klima-Sensitivität von Baumarten gezogen werden. Allerdings kann das zukünftige Klima Eigenschaften aufweisen, die aktuell nirgends oder nur sehr kleinflächig auf der Erde anzutreffen sind. Baumarten müssen sich also zum einen an sich rasch in eine Richtung ändernde Witterungsverhältnisse anpassen können und zum anderen (zukünftig zunehmende?) Extremereignissen verkraften. Insofern stellt die Klima-Sensitivität eine Kombination aus der → Trockenstress-Sensitivität und der → Witterungs-Sensitivität der Baumarten dar.
Matrixpotenzial (ψ_m); Syn. Kapillarpotenzial; vgl. Saugspannung	„Es umschließt alle durch die (Boden-)Matrix auf das Wasser ausgeübten Einwirkungen. <u>Je weniger Wasser ein Boden enthält, desto stärker</u> halten die matrixbedingten Kräfte es fest, desto schwerer ist es also dem Boden zu entziehen.“ (SCHEFFER ET AL. 2010, 224). Maßeinheit ist Hektopascal (hPa) mit negativem Vorzeichen. Streng genommen ist das Matrixpotenzial (Kapillar- und Kohäsionskräfte der Bodenmatrix) ein Teil des Gesamtwasserpotenzials, das sich neben dem Matrixpotenzial, aus dem Gravitationspotenzial (Gewicht des Wassers) und dem osmotischen Potenzial (Partialdrücke von im Wasser gelösten Stoffen) zusammensetzt. In ungesättigten Böden spielt das Gravitationspotenzial keine Rolle und das osmotische Potenzial ist i.d.R. sehr klein, deshalb werden die Begriffe Gesamtwasserpotenzial und Matrixpotenzial oft synonym verwendet.
Radialzuwachsreihe; vgl. Indexserie	Hierunter wird die mittlere Zeitreihe des Radialzuwachses eines Standorts und einer Baumart verstanden. In der vorliegenden Untersuchung wurden pro Standort und Baumart fünf Bäume analysiert, d.h. die Radialzuwachsreihe besteht aus dem arithmetischen Mittel von fünf Zeitreihen. Die einzelnen Radialzuwachsreihen wiederum bestehen aus dem quadratischen Mittel der auf den jeweiligen Stammscheiben vermessenen Radien. Die BHD-Scheibe wurde dabei i.d.R. mit acht Radien, die darüber liegenden Scheiben mit vier Radien vermessen. In dendrochronologischen Arbeiten wird die Radialzuwachsreihe als Jahrringchronologie bezeichnet. Da den Chronologien aber meist nur ein bis zwei Bohrkernentnahmen pro Baum und die Vermessung der Jahrringbreite, nicht des Radialzuwachses, zugrunde liegt, wird der Begriff Chronologie in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet.

Recovery	Ausdruck für die Erholungsreaktion nach einer Störung. Im Kontext dieser Arbeit wird der Radialzuwachs im zu definierenden Erholungszeitraum dem Zuwachs während der Störungsphase, z.B. dem Zuwachs im → Trockenjahr, gegenübergestellt (im Anhalt an LLORET ET AL. (2011), vgl. hierzu Kapitel 3.4.3.5).
Resilienz	Kennzahl für die Belastbarkeit eines Systems. In der vorliegenden Arbeit wird dabei der Radialzuwachs im Erholungszeitraum mit dem Zuwachs im Referenz- oder Ausgangszeitraum verglichen. Ein Wert nahe 1 bedeutet, dass das Zuwachsniveau von vor der Störung fast erreicht wurde, bei Werten über 1 wird dieses sogar überschritten (im Anhalt an LLORET ET AL. (2011), vgl. hierzu Kapitel 3.4.3.5).
Resistenz	Widerstandsfähigkeit eines Systems gegenüber Störungen. Für den Bereich der Jahrringforschung bedeutet dieses, dass Bäume auf Störungen, also z.B. auf → Trockenjahre, mit Radialzuwachseinbrüchen reagieren. Je geringer der Zuwachseinbruch im Vergleich zum Ausgangszustand ist, desto höher ist die Resistenz des individuellen Baumes (im Anhalt an LLORET ET AL. (2011), vgl. hierzu Kapitel 3.4.3.5).
Saugspannung; Syn. Wasserspannung; vgl. Matrixpotenzial	Negativer Druck des Bodenwassers relativ zum atmosphärischen Druck, dadurch wird die Bindungsintensität des Wassers an die Bodenmatrix angegeben (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Die Saugspannung wird aus dem Matrixpotenzial und der Dichte des Bodenwassers berechnet. Wenn man davon ausgeht, dass die Dichte des Bodenwassers 1 ist, was z.B. in der Modellierung mit LWF-BROOK90 der Fall ist, dann entspricht die Saugspannung dem Matrixpotenzial. „Im deutschsprachigen Raum wird anstelle des Begriffes: Matrixpotenzial häufig auch der der Wasserspannung verwendet. Hierunter versteht man den Betrag des Matrixpotenzials“ (SCHEFFER ET AL. 2010, 224). Maßeinheit für die Saug- oder Wasserspannung ist Hektopascal (hPa) mit positivem Vorzeichen oder wenn logarithmiert der pF-Wert.
Sensitivität	Unter Sensitivität wird allgemein verstanden, wie empfindlich z.B. ein Messinstrument, eine Person oder eine Kennzahl auf Veränderungen der sie beeinflussenden Größe reagiert. Im Zusammenhang mit waldwachstumskundlichen Fragestellungen könnte darunter verstanden werden, wie stark der Zuwachs von Bäumen nach Störungen einbricht und sich anschließend wieder erholt. Diese Zusammenhänge werden in dieser Arbeit über die Begriffe: → Resistenz, → Recovery und → Resilienz beschrieben. Sensitivität wird in dieser Arbeit als Antonym (Gegensatz) zur Toleranz verstanden und beschreibt, wie stark das Wachstum einer Baumart von einzelnen Witterungsparametern abhängig ist und welche Trockenstress-Reaktion sie zeigt. → Witterungs- und → Trockenstress-Sensitivität wiederum beeinflussen die Klima-Sensitivität einer Baumart.
Standortswald	Der Standortswald gibt die Namen von bis zu drei Hauptbaumarten wieder, die auf der jeweiligen Standortseinheit nach dem Modell der „heutigen potentiellen natürlichen Vegetation“ zu erwarten wären (ANONYMUS 2002).

<p>Transpiration; Syn. „produktive Verdunstung“</p>	<p>Abgabe von Wasserdampf durch Pflanzen in die Atmosphäre, also die sogenannte Pflanzenverdunstung (im Anhalt an: DEUTSCHER WETTERDIENST 30.05.2014), streng genommen gehört auch die Verdunstung aus der Tierwelt zur Transpiration, wobei in beiden Fällen die Verdunstung aus dem Organismus heraus, d.h. aufgrund der Atmungsprozesse des Lebewesens gemeint ist.</p> <p>Die jährliche Transpiration in Buchenbeständen schwankt nach einer Literaturrecherche von PECK UND MAYER (1996) zwischen 268 und 601mm/Jahr (Mittel aus neun analysierten Quellen: 363mm/Jahr) in Eichenbeständen zwischen 171 und 327mm/Jahr (Mittel aus sieben analysierten Quellen: 285mm/Jahr).</p>
<p>Trockenheit; vgl. Aridität</p>	<p>Im weiteren Sinne: Temporärer, periodisch wiederkehrender Rückgang von Niederschlägen in einem bestimmten Gebiet (im Anhalt an MALIVA, MISSIMER 2012).</p> <p>Im engeren Sinne: Ein Zeitintervall, im Allgemeinen von einigen Monaten Dauer, in dem die Wasserversorgung an einem bestimmten Standort im Vergleich zum langjährigen Mittel unterschritten wird (im Anhalt an PALMER 1965).</p>
<p>Trockenheitsindices; Syn. Dürre-Indices</p>	<p>Eine Maßzahl zur Quantifizierung der Ausprägung von Trockenheit, dabei werden Niederschlag, Temperatur und ggf. die Bodenwasserspeicherkapazität an einem bestimmten Standort ins Verhältnis zueinander gesetzt. Für Waldökosysteme werden eine Reihe verschiedener Trockenheitsindices verwendet, z.B.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Standard Precipitation Index (SPI) (MCKEE ET AL. 1993) • Palmer Drought Severity Index (PDSI) (PALMER 1965) • self calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI) (WELLS ET AL. 2004) <p>(im Anhalt an: BUNDESFORSCHUNGSZENTRUM FÜR WALD 05.08.2014).</p> <p>Einen guten Überblick mit einer Bewertung von verschiedenen Trockenheitsindices bezüglich ihrer Anwendbarkeit in Wäldern gibt METTE ET AL. (2011).</p>
<p>Trockenjahr</p>	<p>Jahre in der aufsteigenden Reihe einer Periode (z.B. 1961-1990) mit Niederschlagssummen unterhalb des Jahres, in dem 10 % der Gesamtsumme erreicht werden (im Anhalt an ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996)).</p>
<p>Trockenperiode; Syn. Trockenstress</p>	<p>Ein mehr oder weniger langer Zeitraum mit ausgeprägter trockener Witterung (im Anhalt an: DEUTSCHER WETTERDIENST 30.05.2014). Für Waldbestände wird laut dem ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996) davon ausgegangen, dass es in einer Trockenperiode zu einer mehr als 20 Tage dauernden Einschränkung der Wasseraufnahme kommt. Dieses ist der Fall, wenn das real nutzbare Wasserangebot im effektiven Wurzelraum in der Vegetationszeit nur die Hälfte der → nutzbaren Feldkapazität an dem Standort beträgt.</p>
<p>Trockenstress-Toleranz Ant. Trockenstress-Empfindlichkeit Ant. Trockenstress-Sensitivität</p>	<p>Fähigkeit von Pflanzen/Bäumen eine → Trockenperiode ohne langfristig negative Auswirkungen auf ihren „normalen“ Zuwachsverlauf zu überstehen. Stress wird hierbei als „akuter Belastungszustand, der über Abweichungen vom optimalen Zustand zu Schädigungen führen kann“ (ROLOFF 2012, 161) verstanden, wobei als Belastungsfaktor (Stressor) eine → Trockenperiode wirkt. Vgl. auch → Sensitivität</p>

<p>Wetter; vgl. Klima; vgl. Witterung</p>	<p>Physikalischer Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in einem auch kürzeren Zeitraum an einem bestimmten Ort oder in einem Gebiet. Es wird z.B. durch die Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Bewölkung etc. charakterisiert (im Anhalt an: DEUTSCHER WETTERDIENST 30.05.2014).</p>
<p>Witterung; vgl. Klima; vgl. Wetter</p>	<p>Allgemeiner oder vorherrschender Charakter des Wetterablaufs eines bestimmten Zeitraums, von einigen Tage bis zu ganzen Jahreszeiten. Im Vergleich zum → Klima ist der betrachtete Zeitraum wesentlich kürzer, im Vergleich zum → Wetter länger (im Anhalt an: DEUTSCHER WETTERDIENST 30.05.2014).</p>
<p>Witterungs-Sensitivität Syn: Witterungs- Empfindlichkeit</p>	<p>Die Witterungs-Sensitivität bezeichnet den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Witterungsparametern (i.d.R. Niederschlag und Temperatur) und verschiedenen Wachstumsgrößen. Anders als die Trockenstress-Sensitivität steht dabei nicht eine Trockenperiode im Vordergrund, sondern die durchschnittlichen Witterungsverhältnisse an einem speziellen Standort. Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird die Witterungs-Sensitivität von Buchen und Eichen anhand der „response functions“ und der Korrelationsanalysen zwischen täglichen Niederschlags-, Temperatur- und Matrixpotenzialwerten mittels CLIMTREG untersucht. Witterungs-sensitive Baumarten zeigen nach dieser Definition hohe Zusammenhänge zwischen einzelnen Witterungsparametern und ihrem Wachstum, während witterungs-tolerante auf dieselben Wachstumsparameter am gleichen Standort kaum reagieren. Genauso werden die Unterschiede zwischen witterungs-sensitiven und witterungs-toleranten Baumarten deutlich, wenn deren Zuwachs entlang eines Standortsgradienten untersucht wird, der eine Veränderung der relevanten Witterungsparameter beinhaltet.</p>

1 Einleitung

1.1 Bedeutung von Konkurrenz zwischen Buche und Eiche aus forstlicher Sicht

Die Bewirtschaftung von Buchen-Eichen-Mischbeständen war und ist wegen der unterschiedlichen Wuchsdynamik dieser beiden weitverbreiteten Laubbaumarten eine besondere Herausforderung. Die Förderung der Eiche im physiologischen Optimum der Buche (ELLENBERG, LEUSCHNER 2010, 124) bedeutet auf den meisten Standorten ein „Wirtschaften gegen die Natur“ und v.a. im Hinblick auf das Ziel der natürlichen Verjüngung der Bestände mit hohen Eichen-Anteilen einen nicht zu unterschätzenden Aufwand. Trotzdem wird dieser Aufwand vielerorts betrieben und nicht zuletzt mit der möglicherweise höheren Trockenstress-Toleranz der Eichen in Zeiten des Klimawandels begründet. Neben diesem Argument sprechen vielfältige weitere Aspekte für die Förderung der Eiche, so z.B. die hohen Erlöse für Eichenwertholz: Mit Eichen-Furnier, aber auch Eichen-Stammholz lassen sich deutlich höhere Preise erzielen, als mit denselben Sortimenten und Qualitäten der Buche. Auch naturschutzfachliche Gesichtspunkte sprechen für eine Förderung der Eiche. Viele prominente totholzbewohnende Insekten kommen ausschließlich an Eichen vor. Nicht zuletzt gibt es auch historische Argumente für die Eichenförderung. Neben der früher bedeutenden Schweinemast in den Eichenmittelwäldern spielte die Eiche aufgrund ihrer Eignung für die Fassherstellung in vielen Kommunalwäldern, traditionell eine große Rolle. Auch wenn es kaum noch Fasshersteller in Baden-Württemberg gibt, lebt die kulturelle Verbindung zwischen Wein- und Eichenanbau auch aufgrund der Renaissance der im Eichenfass gereiften Weine, der sogenannten Barrique-Weine, wieder auf.

In Deutschland beträgt der Flächenanteil der Buche laut den Erhebungen der Bundeswaldinventur II (BWI II) 14.8 %, derjenige der Eiche 9.6 %. In Baden-Württemberg ist der Buchenanteil mit 20.6 % etwas höher als im Bundesdurchschnitt, derjenige der Eiche mit 7.1 % dagegen etwas niedriger. Damit sind die beiden Baumarten die wichtigsten Laubbaumarten sowohl auf Bundesebene als auch im Land. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Buchen- und Eichenflächenanteile und die absoluten Flächen in den verschiedenen Bundesländern. Hinsichtlich der absoluten mit Buchen bestockten Flächen sind Bayern, Baden-Württemberg und Hessen (ca. 296.400 ha, 271.900 ha, 247.400 ha) die führenden Bundesländer; Rheinland-Pfalz, Bayern und Nordrhein-Westfalen (ca. 158.000 ha, 148.400 ha, 134.600 ha) haben die absolut größten Eichenflächen, wobei die BWI II leider nicht zwischen Trauben- und Stieleichen unterscheidet. Auf der Basis von Forsteinrichtungsdaten im Staats- und Körperschaftswald gehen EDER UND ROSE (1995) für Rheinland-Pfalz von einem Anteil der Traubeneiche von 87 % aus. Laut BWI II ist die Eiche in Baden-Württemberg auf ca. 94.200 ha vertreten, Baden-Württemberg liegt damit in der Reihenfolge der Bundesländer an 6. Stelle. Während die Buche in Baden-Württemberg im ganzen Land - mit Ausnahme der höheren Lagen des Schwarzwaldes - verbreitet ist, konzentriert sich das Eichenvorkommen auf die mittleren und tiefen Lagen mit höheren Jahresmitteltemperaturen, dieses sind im Wesentlichen die Wuchsgebiete Oberrheinische Tiefebene und Neckarland.

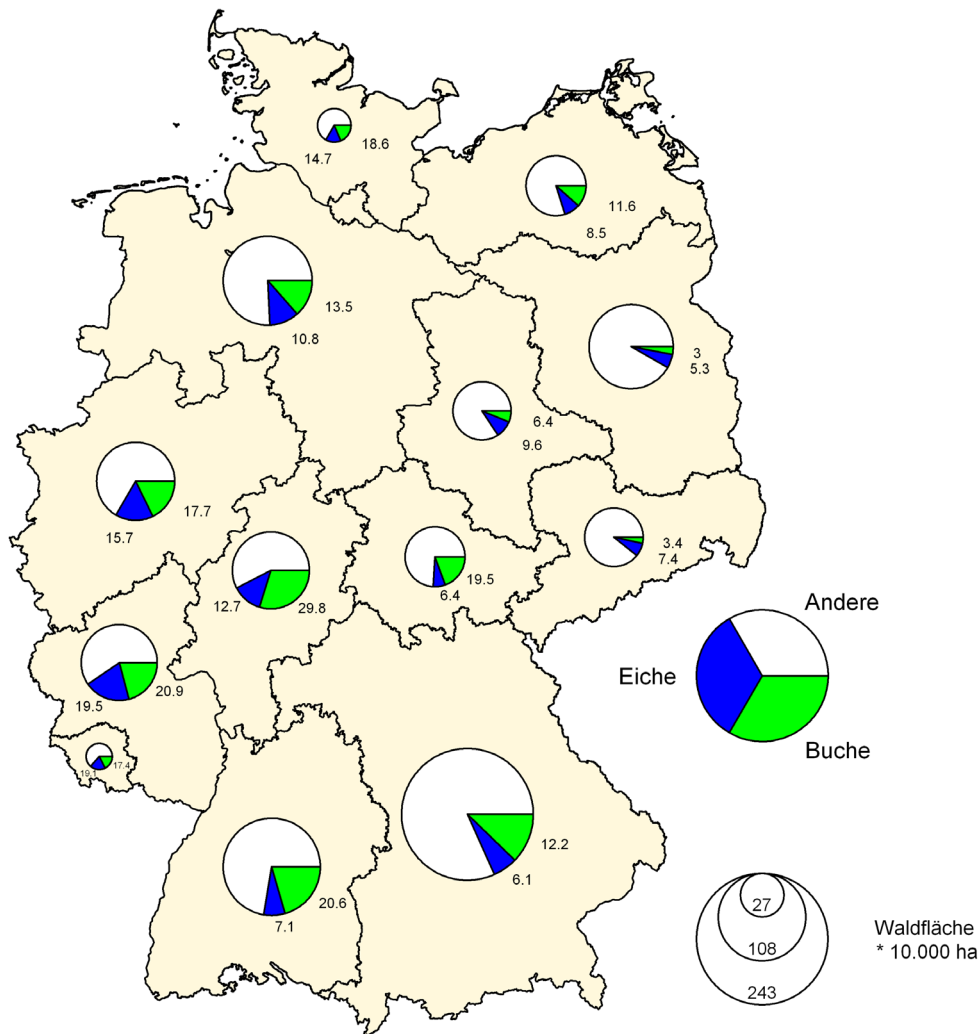


Abbildung 1: Buchen- und Eichenanteile in den Bundesländern

Dargestellt sind die Anteile in allen Waldbesitzarten. Die Größe der Kreisdiagramme ist abhängig von der absoluten Waldfläche des Bundeslandes. Die Zahlenangaben geben die prozentualen Anteile der Baumart im jeweiligen Bundesland an. Quelle: (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) Rheinlandpfalz hat die relativ und absolut größten Eichenanteile, Bayern die absolut größten Buchenanteile und Hessen die relativ größten Buchenanteile.

Abbildung 2 stellt die Baumartenanteile, bzw. -flächen der einzelnen Landkreise in Baden-Württemberg im Kreisdiagramm auf der Grundlage der BWI II-Daten dar (FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTEMBERG). Hierbei ist zu beachten, dass v. a. bei den Landkreisen mit geringen Anteilen der jeweiligen Baumart von einem hohen Stichprobenfehler mit einer einfachen Standardabweichung von bis zu 30 % ausgegangen werden muss. Im öffentlichen Wald von Baden-Württemberg sind die Buchenanteile deutlich höher als im Privatwald: Im Körperschafts- und Staatswald liegt der Buchenanteil bei rund 24 %, während im Privatwald die Buche mit lediglich 16.3 % vertreten ist. Anders verhält sich dies bei der Eiche, hier liegen die Anteile im Staatswald mit 6.3 % und im Privatwald mit 5.8 % etwas unter dem Landesschnitt, im Körperschaftswald mit 9.4 % jedoch deutlich darüber (FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTEMBERG). Diese waldbesitzarten-spezifischen Abweichungen sind jedoch vor dem Hintergrund der unregelmäßigen Verteilung der Besitzflächen über das Land zu interpretieren. So konzentrieren sich große Staatswaldkomplexe auf die Hochlagen des Schwarzwaldes, was beispielsweise den geringen Eichenanteil in dieser Waldbesitzart weitestgehend erklärt.

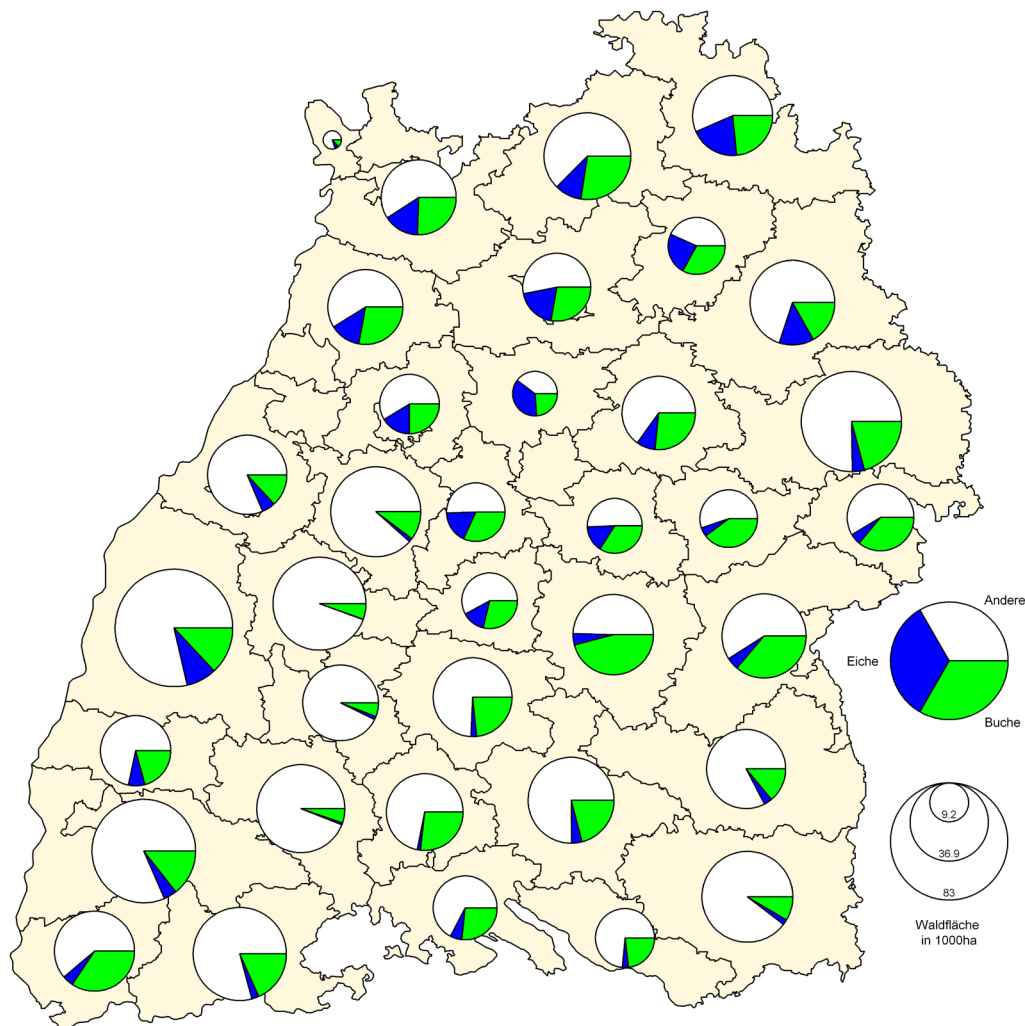


Abbildung 2: Buchen- und Eichenanteile in den Landkreisen von Baden-Württemberg

Dargestellt sind die Anteile in allen Waldbesitzarten. Die Größe der Kreisdiagramme ist abhängig von der absoluten Waldfläche des Landkreises. Quelle: (FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG)

Die Buche hat größere Anteile in fast allen Landkreisen in Baden-Württemberg, mit Ausnahme der Landkreise deren Wälder fast ausschließlich im Schwarzwald liegen. Die Eichenanteile sind in den Landkreisen entlang des Oberrheins, im Neckarland und im Odenwald bedeutend.

In der geschichtlichen Betrachtung der Buchen- und Eichenanteile im öffentlichen Wald von Baden-Württemberg, fällt auf, dass der Eichenanteil seit über 100 Jahren zwischen 6 und 8 %, schwankt, während die Buche ihre Anteile seit den 1970er Jahren von 21 auf heute 26 % steigern konnte (MOOSMAYER 2002). Auch wenn der Gesamtanteil der Eiche im öffentlichen Wald nicht merklich zugenommen hat, so zeigt die Auswertung der BWI II über alle Waldbesitzarten hinweg doch, dass beiden Baumarten in Baden-Württemberg in den letzten 15 Jahren steigende Anteile verzeichnen. Zwischen der BWI I (Stichjahr: 1987) und der BWI II (Stichjahr: 2002) stieg der Buchenanteil um 14.5 %, der Eichenanteil um 8.6 % (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT). Dass diese steigende Tendenz beider Baumarten jedoch in den letzten Jahren vor allem zugunsten der Buche erfolgt, zeigt eine Auswertung zum Baumartenanteil der Altersklasse Ia im öffentlichen Wald von Baden-Württemberg. Laut aktueller Forsteinrichtungsstatistik mit Bezugszeitraum 2001 – 2010 wird für die 1 bis 10jährigen Bestände der Buchenanteil auf 24 %, der Eichenanteil dagegen auf lediglich 7 % geschätzt (Joos 12. November 2013). Damit liegt die Eiche auf dem Niveau der langfristigen Planung. Die Buche, deren langfristig geplanter Anteil 32 % beträgt (vgl. MOOSMAYER 2002, 72, Tabelle 5ff.), liegt jedoch noch unter dem Zielniveau.

Im vom Menschen unbeeinflussten Naturwald Mitteleuropas wäre die Eiche nur auf wenigen Standorten ausreichend konkurrenzkräftig, um sich gegenüber der Buche auf lange Sicht zu behaupten (LEUSCHNER 1998). Lediglich an der Feucht- und Trockenheitsgrenze des Buchen-Herrschaftsbereichs kommen Wälder mit Stiel- oder Traubeneichen als Hauptbaumart vor (ELLENBERG, LEUSCHNER 2010). Aus den bekannten Ökogrammen (ebenda, S. 418) wird deutlich, dass die Eichen sich gegenüber der Konkurrenz der Buche im gemäßigt-subozeanischen Klima Mitteleuropas nur in einem engen Bereich durchsetzen können. Die Traubeneiche kann nur am trockenen und sauren Rand des dargestellten Feuchtigkeits- und Säurebereichs zur Herrschaft gelangen, die Stieleiche zusätzlich am feuchten und sauren und am trockenen und basischen Rand (vgl. Abbildung 4). ELLENBERG UND LEUSCHNER bezeichnen den Bereich, in dem die „Baumart bei natürlichem Konkurrenzkampf mehr oder minder stark zur Herrschaft gelangt“ (2010, 124), als sogenanntes „Existenzoptimum“ der Baumart.

Die hohe Konkurrenzkraft der Buche wird auch aus den hergeleiteten Prozentzahlen für die beiden Baumarten im natürlichen Wald deutlich. MOOSMAYER (2002, 25, Tabelle 1ff.) gibt für die Fläche des öffentlichen Waldes in Baden-Württemberg einen Buchenanteil von 61 % und einen Eichenanteil von 9 % im natürlichen Baumartenverhältnis an. Auch wenn die Herleitung dieser Prozentzahlen mit methodischen Schwierigkeiten verknüpft ist (vgl. MOOSMAYER 2002, 21ff.), bestätigen neuere Untersuchungen (REIDL ET AL. 2013) den hohen, und im Vergleich zu MOOSMAYER vermutlich noch höher einzuschätzenden Buchen- und geringer einzuschätzenden Eichenanteil in der potenziellen natürlichen Vegetation im Gesamtwald von Baden-Württemberg. Nach der aktuellen Kartierung der potenziellen natürlichen Vegetation in Baden-Württemberg, die auf einem „standörtlich-vegetationskundlichen Ansatz ... [beruht]“ (ebenda, S. 15), würden die beiden Eichenarten in folgenden Pflanzengesellschaften vorkommen:

Eichenwälder bodensaurer Standorte:

- Habichtskraut-Traubeneichenwälder
- Pfeifengras-Stieleichenwald

Hainbuchenwälder

- Eichen-Eschen-Hainbuchen-Feuchtwald (v.a. SEi)
- Waldlabkraut-Traubeneichen-Hainbuchenwald

Eichen-Trockenwälder (Flaumeiche, SEi und TEi)

Auen- und Sumpfwälder mit Esche und Erlen

- Stieleichen-Eschen-Ulmen-Auenwald

Die Dominanz der Buche in Bu-Ei-Mischbeständen beschreibt KRAHL-URBAN (1959, 144) mit deutlichen Worten: „In Westeuropa ist ... die Buche im allgemeinen wuchsüberlegen, so dass sie bei ungehinderter Entwicklung zu einer ernsten oder sogar tödlichen Gefahr für die Eiche wird.“ Laut demselben Autor ist der Traubeneichen-Buchen-Mischbestand aber dennoch „... nicht nur einer der verbreitetsten, sondern auch der wirtschaftlich bedeutungsvollsten Eichen-Mischbestandstypen.“ (ebenda, S. 146). Unter heutigen Preisrelationen dürften im Hinblick auf Laubholzmischbestände, allerdings die Eichen-Buntlaubholz-Mischungen, z.B. mit Bergahorn oder Kirsche, jedoch ökonomisch noch attraktiver sein, als die Eichen-Buchen-Mischbestände.

Sicherlich hat auch die an vielen Orten inzwischen seit Jahrzehnten praktizierte einzelstammweise Bewirtschaftung der Bestände die Verbreitung der Schattbaumart Buche über die Naturverjüngung weiter gefördert. Dass auch in eichen-dominierten Mischbeständen ohne forstliche Bewirtschaftung die beigemischte Buche die Naturverjüngung dominiert, zeigen z.B. PETRITAN ET AL. (2013). Sie analysieren die Naturverjüngung in den Lücken eines TEi-Bu-Bestandes in einem ca. 260 ha großen Naturreservat (Runcu-Grosi) in den Karpaten, wobei die Studie jedoch auf einen Teilbereich von ca. 32 ha begrenzt war. 88 % der gezählten, über 130 cm hohen, naturverjüngten Bäume in den Lücken waren Buchen, nur 3 % waren Eichen, obwohl der Bestandesvorrat zu 90 % aus Eichen bestand.

Trotz ihrer in der potenziellen natürlichen Vegetation sehr viel geringeren Anteile wird die Traubeneiche von LEUSCHNER (1998, 5) als „schärfste Konkurrentin [der Buche] in den westdeutschen Mittelgebirgs- und Flächenland-Landschaften“ bezeichnet. Dass diese Konkurrenz auf den meisten Standorten eindeutig zu Gunsten der Buche ausfällt, zeigt z.B. SCHULTE (2004) nach der Analyse von 30jährigen Beobachtungsreihen zur Vitalität von Buchen und Eichen in 55 Naturwaldzellen in Nordrhein-Westfalen. Die Autorin stellt fest, dass die Vitalität der Eichen insgesamt abgenommen hat, überproportional jedoch bei den Eichen in Buchengrundbeständen. SCHULTE schließt ihren Beitrag mit der Bemerkung: "Starker Konkurrenzdruck der Buche schränkt offenbar die Vitalität der Eiche erheblich ein." (ebenda, S. 18). Zu ähnlichen Ergebnissen gelangen auch ROHNER ET AL. (2012) anhand von Wiederholungsinventuren in elf Bu-Ei-dominierten schweizerischen Naturwaldreservaten. Sie zeigen nach einem Beobachtungszeitraum von über 50 Jahren, dass die Eiche einer gegenüber der Buche deutlich höheren Mortalität ausgesetzt war und diese mit zunehmender Bestandesdichte ansteigt. Das Klima hatte im Vergleich zur Dichte oder zum BHD der Bestände einen geringen Einfluss auf die Mortalität der beiden Baumarten. Die Autoren interpretieren ihre Ergebnisse dahingehend, dass die Eiche insgesamt eine geringere Konkurrenzstärke und den höheren Lichtbedarf als die Buche habe.

1.2 Verbreitung und mögliche Klima-Sensitivität von Buchen und Eichen

Für Mitteleuropa entwickelte ELLENBERG bereits 1963 einen Quotienten, um die abnehmende Konkurrenzkraft der Buche zu beschreiben (ELLENBERG 1963). Dieser berechnet sich aus der mittleren Temperatur im Juli in °C multipliziert mit 1000 und dividiert durch die mittlere jährliche Niederschlagssumme. Quotientenwerte zwischen 10 und 20 zeigen demnach ein Klima an, in dem die Buche absolut dominiert, bei Werten zwischen 20 und 30 lässt die Konkurrenzkraft der Buche etwas nach und die Eiche ist beigemischt, bei Werten von über 30 können Eichenmischwälder entstehen, da selbige eine höhere Konkurrenzkraft hat und die Buche allmählich verschwindet (ELLENBERG, LEUSCHNER 2010, 214, Tabelle 27ff.).

Ohne jegliche Berechnungen veranschaulichen die Klimahüllen von KÖLLING ET AL. (2007) in einem ersten, groben Eindruck die mögliche Klima-Sensitivität von Buchen und Eichen. Abbildung 3 stellt die Klimahüllen von Buche und Traubeneiche im Vergleich zueinander dar. Demnach hätte die Buche eine Temperaturamplitude von ca. 3.5 bis ca. 13.5°C Jahresdurchschnittstemperatur und eine Niederschlagsamplitude von ca. 475 mm bis ca. 1350 mm Jahresniederschlagssumme. Im Vergleich dazu kommt die Traubeneiche in einem Temperaturbereich zwischen ca. 4.5 bis ca. 13.5°C Jahresdurchschnittstemperatur und einem Niederschlagsbereich von ca. 450 mm bis ca. 1300 mm Jahresniederschlagssumme vor. Die Unterschiede in den Extremwerten sind also relativ gering, wobei die roten Kreise in Abbildung 3 zeigen, dass - wenn das Klimaszenario B1 so in Deutschland eintritt - die Buche im trockenen und warmen Bereich der eingeschätzten natürlichen Verbreitung, dann nicht mehr vorkommen würde, während die Traubeneiche sich trotz Klimaerwärmung noch in ihrer Klimahülle befände. Außerdem sind in Abbildung 3 im Vorgriff auf die Erläuterungen in Kapitel 3.5.1 bereits die Niederschlags- und Temperaturverhältnisse in den beiden Untersuchungsregionen dieser Arbeit bezogen auf den Zeitraum, dem die Daten der Klimahüllen zugrunde liegen, dargestellt (1950 – 2000). Die Daten der Untersuchungsregionen basieren dabei auf den (vermutlich deutlich realistischeren, siehe unten) Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes. Grundlage der Klimahüllen von KÖLLING ET AL. sind dagegen die Niederschlags- und Temperaturdaten der Worldclim-Datenbank für den Zeitraum 1950 bis 2000 (HUMANS ET AL. 2005), sowie die natürliche Vegetation Europas (BOHN ET AL. 2000), die Waldbedeckung von Deutschland (KEIL ET AL. 2011) und das Klimaszenario B1 im regionalen Klimaszenario WETTREG (SPEKAT ET AL. 2007).

Zur Plausibilität der den Klimahüllen zugrundeliegenden Witterungsdaten sei angemerkt, dass für die Untersuchungsstandorte, die in dieser Arbeit ausgewertet werden, u.a. auf die Rasterdaten des

Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen wurde (monatliche Niederschlagssummen und monatliche Durchschnittstemperaturen, vgl. Kapitel 3.5.1). Ein Vergleich der DWD-Daten mit den Worldclim-Daten für den gleichen Bezugszeitraum (1950-2010) zeigt, dass die Niederschlagssumme der Worldclim-Daten an den Untersuchungsstandorten generell ca. 10 % niedriger liegen als die der DWD-Daten und in einem Einzelfall sogar um fast 40 % abweicht. Bereits in der Zusammenfassung weisen die US-amerikanischen Hauptautoren der Worldclim-Daten auf die hohe Auflösung ihrer Daten (30 x 30 Sekunden geographischer Länge und Breite, was in Baden-Württemberg einer Kantenlänge des Rasters von ca. 0.9 x 0.6 km entspricht), aber auch auf die hohen Unsicherheiten in ihrem Datensatz hin, der für bergige Regionen am größten sei (HIJMANS ET AL. 2005). Auch KÖLLING (pers. Mitteilung am 11.7.2014) bestätigt eine Verzerrung der Niederschlagsdaten von Worldclim. Daneben wird bei der Aufstellung der Klimahülle mit Kernel-Dichten gearbeitet, wobei das unterste 5 %-Quantil abgeschnitten wird (KÖLLING, ZIMMERMANN 2007). Diese beiden Gründe (Verzerrung und Abschneiden der „Ausreißer“) führen dazu, dass die Untersuchungsregion Schwarzwald in der unten stehenden Grafik teilweise außerhalb der aktuellen „Waldhülle“ von Deutschland dargestellt ist.

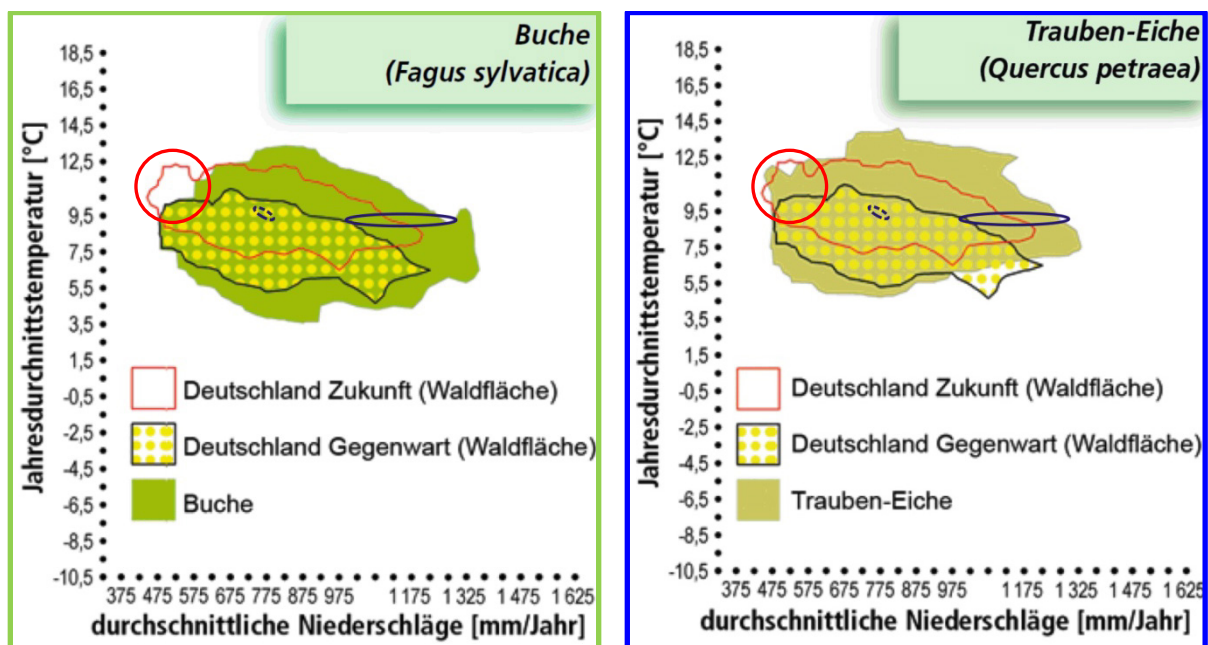


Abbildung 3: Klimahülle von Buche (links) und Traubeneiche (rechts)

Die ursprüngliche Abbildung von KÖLLING ET AL. (2007) wurde ergänzt um die Klimaverhältnisse in den beiden Untersuchungsregionen (schwarze Ellipsen) und die Unterschiede im trocken-warmen Bereich (rote Kreise). Die Ellipse mit der gestrichelten Randlinie charakterisiert die Klimaverhältnisse in der Untersuchungsregion „Stromberg“, die Ellipse mit der durchgezogenen Randlinie die Untersuchungsregion „Westabfall des Schwarzwaldes“. Bezugszeitraum für die zugrundeliegenden Witterungsdaten sind die Jahre 1950-2000, KÖLLING ET AL. greifen dabei auf die Worldclim-Daten (HIJMANS ET AL. 2005) zurück, für die Untersuchungsregionen wurden die Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes herangezogen.

Während die Buche am trocken und warmen Rand (rote Kreise) bei Eintritt des Klimaszenarios B1 aus der Klimahülle herausfällt, finden sich für die Traubeneiche in der potenziellen natürlichen Vegetation noch Standorte, die den veränderten Klimabedingungen in Deutschland entsprechen würden.

An den Klimahüllen wird berechnete Kritik geübt. So stellen z.B. BOLTE ET AL. (2008) heraus, dass die Bodenwasserspeicherkapazität unberücksichtigt bleibt, genauso wie die jahreszeitlichen Verteilung der Niederschlags- und Temperaturdaten. Dennoch geben die Klimahüllen erste Hinweise darauf, welche Baumarten vermutlich sensibler auf den Klimawandel und damit auf Trockenstress und Witterungsveränderungen reagieren werden und welche nicht.

Folgende Untersuchungen zur nordöstlichen Verbreitungsgrenze der Buche sollen beispielhaft die Grenzen der Klimahüllen aufzeigen. HERTEL ET AL. (2004) kommen nach der Analyse von Blattmorphologie, Stammsaftfluss und Feinwurzelbiomasse von Buchenaltbeständen entlang eines

Transekts von Mittel- nach Nordostdeutschland zu dem Schluss, dass selbst auf armen Sandböden bei Niederschlägen in der Vegetationsperiode von 260 bis 350 mm die Trockenheitsgrenze der Buche nicht erreicht sei. Dies folgern die Autoren aus der fehlenden Anpassung in der Blattmorphologie bzw. der überproportionalen Feinwurzelneubildungsrate während Trockenperioden im Sommer, und damit der Aufrechterhaltung der Nährstoff- und Wasserversorgung in den untersuchten Beständen (ebenda, S. 35f). TARASIKU (1992, zitiert in CZAJKOWSKI ET AL. 2006) hat als Faktoren für die östliche Verbreitungsgrenze der Buche in Polen eine Niederschlagsmenge von mindestens 320 mm zwischen Mai und Oktober und bis maximal 141 Tage (im Jahr) mit Minustemperaturen herausgearbeitet. Nach CZAJKOWSKI ET AL. (2006) können diese Grenzwerte im Einzelfall über-/unterschritten werden, wenn ungünstige Faktoren durch günstige kompensiert werden. Eine Rolle können z.B. Oberflächenform, Exposition, Hangneigung, Seennähe, Luftfeuchtigkeit und Bodenwasserregime spielen. Außerdem weist CZAJKOWSKI (2006) in seinen Untersuchungen zur östlichen Verbreitungsgrenze der Buche auf die höhere Anpassung der polnischen Herkünfte zum einen gegenüber sommerlicher Trockenheit und zum anderen gegenüber winterlicher Frosthärte hin (ebenda, S. 56).

Inwiefern die Temperaturveränderungen der letzten Jahrzehnte bereits zu einer Veränderung in der vertikalen Verbreitung der Buche beigetragen haben, zeigen PEÑUELAS ET AL. (2007) beispielhaft für die nordwestlich von Barcelona gelegenen Montseny-Berge anhand von Verjüngungsaufnahmen und historischen Fotoserien aus den 1920er Jahren bis heute. Dort werden die Buchen-Bestände in den niedrigen Höhenlagen (ca. 950m üNN) von der Steineiche unterwandert. Außerdem hat sich die von Buchen gebildete Waldgrenze während der letzten 80 Jahre deutlich nach oben verschoben hat. Die Aufwärtsbewegung der Buche in dieser Region führen die Autoren neben der Temperaturerhöhung auch auf geänderte Landnutzungspraktiken zurück.

Generell wird die Klima-Sensitivität der beiden Baumarten, vor allem aber der Buche, auch in der Fachliteratur kontrovers diskutiert. So beurteilen RENNENBERG ET AL. (2004) die aktuelle Ausbreitung und Förderung der Buche vor dem Hintergrund des Klimawandels als kritisch. Die Autoren begründen diese Einschätzung mit der möglichen Verringerung der Konkurrenzkraft der Buche bei erhöhten CO₂-Konzentrationen, mit deren Sensitivität der Photosyntheserate gegenüber Trockenheit, welche anhand von C-Isotopensignaturen analysiert wurde, und deren Empfindlichkeit gegenüber Staunässe und Überflutungen. RENNENBERG ET AL. sehen deshalb in der „... Beimischung von Trockenstress- und Überflutungstoleranten Baumarten, z.B. verschiedenen Eichenarten ...“ eine Möglichkeit „... die Risiken in der Forstwirtschaft weiter zu vermindern.“ (ebenda, S. 221). Andere Autoren sehen die Zukunft der Buche weniger kritisch, v.a. aufgrund des großen Verbreitungsgebietes der Baumart in Europa und aufgrund ihrer insgesamt sehr geringen Schaddisposition (KÖLLING ET AL. 2005). „Man darf daraus schließen, dass das Wassermangelproblem der Buche in Mitteleuropa auch in Zukunft weitestgehend auf Sonderstandorte mit fehlender Wasserspeicherkapazität (Sand, Fels) oder fehlendem pflanzenverfügbarem Wasser (Tonböden) beschränkt bleibt.“ (ebenda, S. 698).

Ohne große Differenzierung hinsichtlich ihrer Eignung im Klimawandel bleiben Buche und Eiche bei der Befragung von 28 Experten aus dem Forst- und Naturschutzbereich aus 6 Bundesländern. Für die Buche sehen 20 Experten und für die Eiche 23 Experten eine zunehmende Bedeutung der Baumart vor dem Hintergrund der Klimaveränderungen (REIF ET AL. 2010).

In der waldbaulichen Literatur wird die Buche bezüglich ihrer Trockenstress-Toleranz teilweise gleich wie die Stieleiche beurteilt (z.B. BRZEZIECKI, KIENAST 1994; OTTO 1994), andere Autoren beurteilen die Buche dagegen gleich wie die Traubeneiche (z.B. JAHN 1991) und wieder andere beurteilen die Buche als empfindlicher gegenüber Trockenstress als beide Eichenarten (z.B. ELLENBERG, LEUSCHNER 2010; NIINEMETS, VALLADARES 2006; PROFESSUR FÜR WALDBAU, PROFESSUR FÜR FORSTSCHUTZ & DENDROLOGIE 1993; RITTERSHOFER 2004).

Vor dem Hintergrund der bislang unzureichenden wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Trockenstress-Toleranz und Witterungs-Sensitivität von (adulten) Buchen und Eichen fordern deshalb viele Autoren weitere Untersuchungen in diesem Bereich, z.B. BONTEMPS ET AL. (2012), LEUSCHNER ET AL. (2001) und weisen explizit auf die bestehenden Kenntnislücken hin (BOLTE 2005).

1.3 Für die Konkurrenz zwischen Buchen und Eichen bedeutende Aspekte des Klimawandels

Der Klimawandel und seine Folgen sind in den Medien ein Dauerthema. Während an den meisten Standorten in Baden-Württemberg die Erhöhung der Jahresdurchschnittstemperaturen bereits nachgewiesen werden kann, sind die Veränderungen im Niederschlagsregime noch kaum signifikant abzuschätzen. Dies trifft auch für die Untersuchungsstandorte dieser Arbeit zu (vgl. Kapitel 4.1.2). Laut dem aktuellen Monitoringbericht des Arbeitskreises KLIWA (ARBEITSKREIS KLIWA 2011a, 12) haben die Temperaturen im Baden-Württemberg z.B. in der Region Hoch-/Oberrhein - in dieser liegen die Bestände der Untersuchungsregion „Westabfall des Schwarzwaldes“ (vgl. Kapitel 3.1.2) - im Zeitraum 1931 bis 2010 im hydrologischen Winterhalbjahr (Nov-April) um 1.1°C und im Sommerhalbjahr um 0.9°C zugenommen. Für die Region Neckar (Untersuchungsregion: Stromberg) betragen diese Werte 1.3 und 1.0°C. Für das Gebiet R3 (Rhein, unterhalb Wiese bis oberhalb Kinzig, Untersuchungsregion „Westabfall des Schwarzwaldes“) werden im Monitoringbericht für den Zeitraum 1931 - 2010 erhöhte Niederschläge im Winterhalbjahr von +13.2 % und im Sommerhalbjahr von -0.2 % angegeben (ebenda, S. 18: Abb. 7 und 8). Für das Gebiet N3 (Enz, Untersuchungsregion: Stromberg) betragen diese Werte +12.5 % und -3.4 %. Für die Veränderungen des Niederschlags liegen die Signifikanzwerte jedoch unter 0.95.

Unbestritten ist die Tatsache, dass die bereits erfolgten Veränderungen des Klimas dazu geführt haben, dass über ganz Europa hinweg, der Frühling früher beginnt und sich die Vegetationsperiode verlängert (MENZEL ET AL. 2006).

Welchen weiteren Verlauf der Klimawandel nehmen wird, ist dagegen weniger eindeutig. Aufgrund der verschiedenen IPCC-Szenarien wurden unterschiedliche regionale Klimamodelle entwickelt. Im Folgenden wird kurz auf die für Baden-Württemberg derzeit aktuellen Modelle eingegangen. Diese wurden im Rahmen des Kooperationsvorhabens der Umweltministerien der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie des Deutschen Wetterdienst „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, KLIWA“, erstellt.

Das Regionale Klimamodell (RCM) für Süddeutschland basiert auf dem IPCC-Emissionsszenario A1B. Dieses geht von einer zukünftig ausgeglichenen Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Brennstoffen aus. Es zeigt, dass die Temperaturen bis 2050 im Durchschnitt um 0.7 bis 1.8°C zunehmen können. Gleichzeitig wird sich nach diesem Modell die Anzahl der heißen Tage mit Maximaltemperaturen von über 30°C fast überall verdoppeln und die Anzahl der Frost- und Eistage wird geringer werden. Außerdem werde sich der "bisherige Trend mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern" fortsetzen (ARBEITSKREIS KLIWA 2012b, 9f.). Für die Regionen Hoch-/Oberrhein und Neckar wird anhand der regionalen Klimaprojektion CCLM Version 4.8 eine Zunahme der mittleren Lufttemperatur von 0.9°C im Winterhalbjahr und von 1.2 bis 1.3°C im Sommerhalbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050 prognostiziert (Bezugszeitraum 1971-2000). Demgegenüber steht eine Veränderung der Winterniederschläge in diesen beiden Regionen um +10.1, bzw. +12.5 %, sowie im Sommerhalbjahr um +1.3, bzw. -1.8 % gegenüber (ARBEITSKREIS KLIWA 2012b, 11). In einem weiteren KLIWA-Bericht wird anhand der statistischen Analyse der Häufigkeiten und maximalen Perioden von kritischen, trockenen Großwetterlagen im Zeitraum 1881 bis 2006 dargestellt, dass "...die Eintrittswahrscheinlichkeit einen trockenen, heißen Sommer im ‚kritischen‘ Sektor ... zu erhalten, bereits heute im Vergleich zu dem Zeitraum vor dem Bruchpunkt [1968, Anmerkung der Verf.] um mehr als den Faktor 16 angestiegen..." ist (ARBEITSKREIS KLIWA 2012a, 28ff.).

Es ist also hinsichtlich der Klima-Toleranz der hier untersuchten Baumarten von zwei getrennt zu untersuchenden Fragestellungen auszugehen. Die eine Frage betrifft die generelle Fähigkeit der Baumarten sich an graduell verändernde Temperatur- und Niederschlagsniveaus anzupassen (Witterungs-Toleranz). Der zweite Fragekomplex sollte die Extremereignisse und hier vor allem die höhere Auftretswahrscheinlichkeit von trockenen und heißen Sommern untersuchen, sich also der Trockenstress-Toleranz der Baumarten widmen. Für die Buche weist BOLTE (2005) in diesem Zusammenhang darauf hin, dass die Anpassung an „extreme Hitze- und Trockenphasen ... die in ihrer Intensität, Häufigkeit und Dauer bisher wahrscheinlich nicht oder nur sehr selten vorkamen...“ (ebenda, S. 1077) hierbei von entscheidenderer Bedeutung seien, als die Anpassung an eine erhöhte Jahresmitteltemperatur.

1.4 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Vor dem Hintergrund der im vorigen Abschnitt genannten bereits stattfindenden und prognostizierten Klimaveränderungen, stellt sich die Frage nach der Förderung von Buche oder Eiche im täglichen waldbaulichen Handeln unter neuen Gesichtspunkten. Entscheidend wird sein, wie schnell und bis zu welchem Grad sich die beiden Baumarten an graduell steigende Temperaturen und geringere Niederschläge anpassen können (Witterungs-Toleranz), aber auch wie stark sie durch zukünftig vermutlich verstärkt auftretende Extremereignisse in Mitleidenschaft gezogen werden bzw. wie schnell sie sich von diesen erholen können (Trockenstress-Toleranz).

In etlichen detaillierten Untersuchungen auf physiologischer Ebene wurden zur Trockenstress-Toleranz der beiden Baumarten bereits viele Erkenntnisse gewonnen (vgl. Kap. 2.6). Es fehlen jedoch vergleichende Analysen beider Baumarten auf der Betrachtungsebene des gesamten Baumes bzw. auf der Ebene von Beständen. Hierzu bieten sich observatorische Studie wie z.B. Stammanalysen auf der Basis von Jahrring- und Höhenzuwachsen an, da sie die Dynamik von kurz-, mittel- und langfristigen dynamischen Prozessen im Wald und deren komplexe multifunktionale Zusammenhänge abbilden (KAHLE ET AL. 2004, 34). Jahrringe und Triebblängen gelten als verlässliche Indikatoren für die Versorgung mit Kohlenhydraten, weshalb sowohl fortschreitende als auch kurzfristige Reaktionen und deren Verzögerungen anhand der Zuwachsraten analysiert werden können (EILMANN, RIGLING 2012, 178f.). Für die Vitalitätsbeurteilung der Bäume wird deshalb z.B. auf den Dauerbeobachtungsflächen in Nordrhein-Westfalen neben anderen Faktoren der Durchmesserzuwachs als ein gut zu messender, sensibler Vitalitätsweiser erhoben (ZIEGLER 2004, 13). Insgesamt ist es in der Waldwachstumskunde jedoch unbestritten, dass das Höhenwachstum nicht überschirmter Bäume weit weniger von der individuellen Konkurrenzsituation, also auch von Durchforstungsmaßnahmen, beeinflusst wird, als das Dickenwachstum (MITSCHERLICH 1970, 71). Grundsätzlich eignet sich deshalb Ersteres besser, um z.B. durch die Witterung oder das Klima gesteuerte, wachstumsbeeinflussende Faktoren bei möglichst geringer Konkurrenzbeeinträchtigung zu untersuchen.

Auch aktuellere, waldwachstumskundliche Untersuchungen haben sich bereits entweder der Buche (z.B. JUMP ET AL. 2006; WEBER ET AL. 2013) oder der Eiche (z.B. DROBYSHEV ET AL. 2008; LÉVY ET AL. 1992; MATISONS ET AL. 2013) oder beiden Baumarten gemeinsam (BONN 1998; CAVIN ET AL. 2013; MICHELOT ET AL. 2012; PRETZSCH ET AL. 2013) gewidmet. Bereits sehr frühe Untersuchungen haben sich immer wieder mit Teilaspekten der Klima-Sensitivität befasst, so beispielsweise mit der Wachstumsreaktion der beiden (und anderer) Baumarten auf Trockenstress nach 1947/49, z.B. SCHOBBER (1951a) an zwei unterschiedlich hoch gelegenen Standorten im Göttinger Wald, KRÖNER (1952) an zwei hinsichtlich der Nährstoff- und Wasserversorgung sehr unterschiedlichen Standorten in Bayern oder GÜNTHER (1955) auf verschiedenen Standortseinheiten des Neckarlandes. Allerdings sind diese Untersuchungen einerseits durch die limitierte Anzahl an Standorten, die fehlende Darstellung der generellen Abhängigkeiten zur Witterung und die unzureichende Abbildung eines echten Gradienten zur Wasserverfügbarkeit gekennzeichnet (vgl.

hierzu Kapitel 2.5.1). Daneben haben die heutigen Fragestellungen mit Bezug auf den Klimawandel für diese Untersuchungen noch keine Rolle gespielt.

Eine umfassende observatorische Untersuchung mit älteren Buchen und Eichen entlang eines Wasserverfügbarkeitsgradienten liegt somit bislang nicht vor. Diese Lücke soll mit der vorliegenden Arbeit geschlossen werden, wobei bereits bei der Auswahl der Untersuchungsbestände darauf geachtet wurde, dass beide Baumarten am identischen Standort, also in einzelbaumweiser Mischung gleichrangig nebeneinander, aufwuchsen und damit eine echte Vergleichbarkeit gegeben ist. Neben den generellen Abhängigkeiten zu ausgewählten Witterungs- und Bodenwasserhaushaltsparametern und deren Veränderung entlang des abgebildeten Gradienten (Witterungs-Toleranz), will diese Arbeit durch die detaillierte Analyse der Trockenstress-Reaktion in und nach den bekannten Trockenjahren 1976 und 2003 einen Beitrag zur Beantwortung der Frage nach der Trockenstress-Toleranz der beiden Baumarten (Trockenstress-Toleranz) ebenfalls in Abhängigkeit von der Wasserversorgung des Standortes geben.

Als weiteren Aspekt beleuchtet die vorliegende Arbeit nicht, wie in allen bislang genannten Studien, nur das Dickenwachstum in Form des Radial- oder Grundflächenzuwachses, sondern analysiert das gegenüber Freistellungseffekten weitgehend unempfindliche Höhenwachstum und gibt damit zusätzliche Hinweise auf das Verhalten der beiden Baumarten in der Konkurrenzsituation. Damit können Rückschlüsse auch hinsichtlich der dankbaren Konkurrenzüberlegenheit einer der beiden Baumarten gezogen werden, sehr viel detaillierter als dies beispielsweise aufgrund von Ertragstafel-Auswertungen möglich wäre.

2 Stand des Wissens

2.1 Unterschiede zwischen Trauben- und Stieleiche

2.1.1 Allgemeine Unterschiede

Standortseigenschaften

In den bereits erwähnten Ökogrammen von ELLENBERG UND LEUSCHNER (ELLENBERG, LEUSCHNER 2010) wird der Traubeneiche im gemäßigt-subozeanischen Klima der submontanen Höhenstufe von Mitteleuropa ein weiter in den trockenen Bereich hineinreichender physiologischer Optimalbereich („Potenzoptimum“) attestiert als der Stieleiche. Der physiologische Optimalbereich ist dadurch definiert, dass die Baumart dort die größte Wuchslleistung unter dem Ausschluss von Konkurrenten erbringen würde. Das „Existenzoptimum“, also der Bereich im Ökogramm, in dem die Baumart im Konkurrenzkampf mit anderen Baumarten zur Herrschaft gelangt, liegt für die Traubeneiche im äußersten trockenen und sauren Randbereich. Sie teilt sich diesen Bereich mit der Stieleiche, deren „Existenzoptimum“ am trockenen Rand die gesamte Amplitude des Basenreichtums abdeckt und am feuchten Rand auch den sauren bis mäßig basenreichen Bereich erreicht. Die Stieleiche hat nach dieser Darstellung also ein sehr viel breiteres Standortsspektrum als die Traubeneiche.

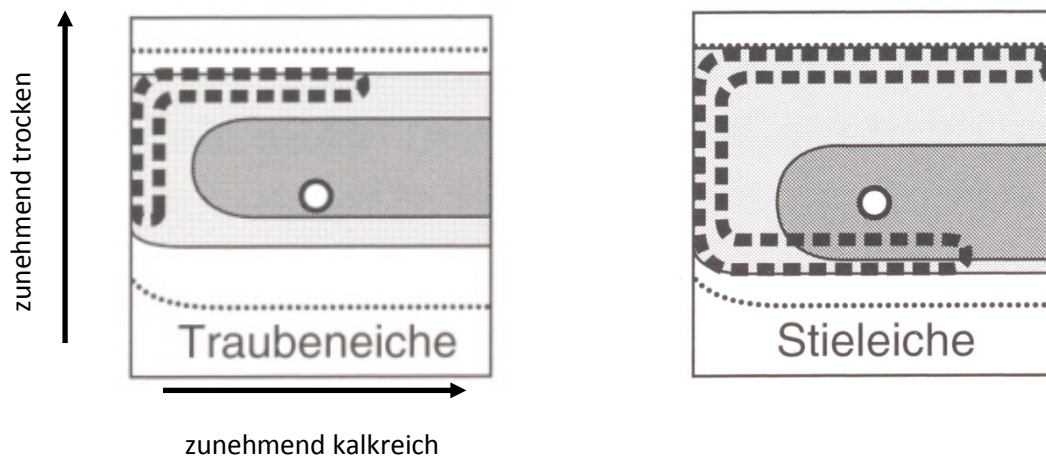


Abbildung 4: Ökogramme von Traubeneiche (links) und Stieleiche (rechts)

Dunkelgrau dargestellt ist der physiologische Optimalbereich („Potenzoptimum“), hellgrau die physiologische Amplitude („Potenzbereich“). Die dicke gestrichelte Umrandung kennzeichnet das „Existenzoptimum“, welches mit anderen Baumarten geteilt wird, die dünn punktierte Linie stellt die Waldgrenze dar, Quelle: (ELLENBERG, LEUSCHNER 2010)

Die Traubeneiche gelangt in der Konkurrenz mit anderen Baumarten im trockenen und sauren Bereich zumindest partiell zur Herrschaft. Die Stieleiche teilt sich sowohl im Hinblick auf die Basenversorgung als auch im Hinblick auf den Wasserhaushalt einen sehr viel größeren Bereich mit anderen Baumarten.

Für die Schweiz wurden die Ökogramme von der Professur für Waldbau und der Professur für Forstschutz & Dendrologie der ETH Zürich (1993) angepasst. Der Herrschaftsbereich, dieser wird auch als „ökologisches Optimum“ bezeichnet und entspricht dem „Existenzoptimum“ bei ELLENBERG UND LEUSCHNER (2010). Für die Traubeneiche in der Schweiz liegt dieses danach ebenfalls im trockenen Bereich, beschränkt sich allerdings nicht nur auf den äußersten Rand, sondern reicht weiter ins Zentrum und deckt neben dem sauren auch den basischen Rand des Standortsspektrums ab. Im Gegensatz zur Darstellung bei ELLENBERG UND LEUSCHNER wird die Stieleiche von den Schweizer Dozenten im gesamten Bereich des Ökogramms nirgends im Herrschaftsbereich gesehen.

Eine Verfeinerung der Ökogramme ist anhand der „Feuchtezahl“ und der „Reaktionszahl“ nach ELLENBERG ET AL. (2003) möglich. Die „Feuchtezahl“ stellt dabei eine zwölfteilige Skala vom

„flachgründig-trockenen Felshang bis zum Sumpfboden“ dar (ebenda, S. 68), die „Reaktionszahl“ eine neunteilige Skala im „Gefälle der Bodenreaktion und des Kalkgehalts“ (ebenda, S. 69). Auch diese, auf pflanzensoziologischen Untersuchungen basierenden, Abstufungen gelten für das westliche Mitteleuropa. Hinsichtlich der Bodenfeuchtigkeit wird die Traubeneiche von ELLENBERG ET AL. der Stufe fünf zugeordnet, die Stieleiche als „indifferent“ (x) klassifiziert. Stufe fünf wird beschrieben mit: „*Frischezeiger*, Schwergewicht auf mittelfeuchten Böden, auf nassen sowie auf öfter austrocknenden Böden fehlend“ (ebenda, S. 68). Die „Reaktionszahl“ ist dagegen für beide Eichenarten „indifferent“.

Morphologie

Die Frage, ob Trauben- und Stieleiche als unterschiedliche Arten zu betrachten sind, wurde auch in der deutschsprachigen Literatur über mehrere Jahre hinweg diskutiert. Vor dem Hintergrund dessen, dass den beiden Spezies in der forstlich-vegetationskundlichen Literatur (z.B. ELLENBERG, LEUSCHNER 2010; OBERDORFER 1992; PROFESSUR FÜR WALDBAU, PROFESSUR FÜR FORSTSCHUTZ & DENDROLOGIE 1993) eindeutige ökologische Nischen und in der waldbaulich-standortkundlichen Literatur eindeutig unterschiedliche Standortsansprüche (BARTSCH ET AL. 1992; BURSCHEL, HUSS 2003; EBERT 2002) zugesprochen werden, mag diese Diskussion zunächst verwundern. Da auch in der Natur eine Hybridisierung der beiden Arten stattfindet und hinsichtlich der Morphologie intermediäre Typen auftreten, plädierten manche Autoren dafür, Stiel- und Traubeneiche lediglich als Unterarten oder Ökotypen zu behandeln (EBERT 2002; KLEINSCHMIT ET AL. 1990), während andere auf die Unzulänglichkeiten des Konzepts der „biologischen Art“ hinweisen (AAS ET AL. 1997). Nach diesem Konzept gehören nur Individuen zu einer Art, die nicht untereinander kreuzbar sind. Neuere Untersuchungen zur Morphologie und Genetik heben wiederum auf den Unterschied zwischen den beiden Arten ab. KREMER ET AL. (2002) untersuchten beispielsweise 14 Blattmerkmale an 3025 Eichen aus neun europäischen Ländern und konnten anhand der Merkmale Blattstiel-Länge und Buchtennervatur 98 % der untersuchten Bäume eindeutig der Trauben- oder Stieleiche zuordnen. Neben diesen unterschiedlichen blattmorphologischen Merkmalen, geben laut DUPOUEY UND BADEAU (1993) die Dichte und Länge der Behaarung an der Blattspreite, sowie die Länge des Fruchstiels, laut AAS (1991) die Größe und Form der Früchte und laut FEUILLAT ET AL. (1997) - weniger deutlich - die holzanatomischen Merkmale, Hinweise auf die Unterscheidung zwischen Trauben- und Stieleiche. Die Unterschiede in der Morphologie der beiden Eichenarten wurden genutzt, um die Artzuordnung auch anhand der genetischen Variabilität der Kern-DNA zu bestätigen (z.B. MUIR, SCHLÖTTERER 2005).

Genetik

Eine Einführung zum derzeitigen Wissensstand der genetischen Differenzierung zwischen Trauben- und Stieleiche geben NEOPHYTOU ET AL. (2014). Demnach ist die Unterscheidung der beiden Arten anhand von sogenannten Mikrosatellitenmarkern in der Kern-DNA möglich. Anders als die Kern-DNA unterscheidet sich die Chloroplasten-DNA der europäischen Eichen-Arten kaum voneinander. Unabhängig von der Eichenart konnten deshalb anhand der Chloroplasten-DNA sechs Herkunftslinien und die postglazialen Rückwanderungswege der Eichen aus ihren Refugialgebieten während der Eiszeiten rekonstruiert werden (KÖNIG, STAUBER 2004; PETIT ET AL. 2002). Die räumlichen Muster der Rückwanderungswege sind allerdings aufgrund der Beeinflussung der Saatgut- und Pflanzgutverteilung durch den Menschen nicht überall gleich deutlich nachweisbar (KÖNIG ET AL. 2002). Als gesichert darf jedoch gelten, dass sich die postglazialen Rückwanderungswege aus den Refugien auf dem Balkan, von Italien und von Spanien im südwestdeutschen Raum gekreuzt haben (NEOPHYTOU, MICHIELS 2013). Bislang nur als Hypothese vertreten wird z.B. von PETIT ET AL. (2004), dass die Traubeneiche die Hybridisierung und anschließende Introgression, d.h. die zwischenartliche Genwanderung durch Rückkreuzungen, nutzt, um - zunächst von der Stieleiche besiedelte Areale - von dieser zu erobern. Hierfür spreche die bessere Samenverbreitung der Stieleiche, die Richtung der Hybridisierung, sowie die erfolgreichere Introgression durch die Traubeneiche in Mischbeständen der beiden Arten. Die

bessere Samenverbreitung wird auf die größeren Eicheln zurückgeführt, die deshalb von Eichelhähern bevorzugt und weiter transportiert werden. Bei der Hybridisierung wurde gezeigt, dass die Traubeneiche weiter fliegende Pollen hat und Stieleichen-Blüten erfolgreicher befruchtet als anders herum (vgl. hierzu auch HÖLTKEN ET AL. 2012, 108). PETIT ET AL. (2004) führen für die Untermauerung ihrer Hypothese auch verschiedene ökologische Unterschiede zwischen den beiden Arten an, u.a.:

- die höhere Schattentoleranz der Traubeneichen-Sämlinge
- der höherer Kronenkonkurrenz-Index der Traubeneiche
- die geringere Anfälligkeit der Traubeneiche gegenüber verschiedenen biotischen Schadfaktoren (v.a. Pilze) und Verbiss
- die größere Trockenstresstoleranz der Traubeneiche (vgl. hierzu Kapitel 2.1.3)

Auch die Tatsache, dass die Stieleiche vor allem auf sauerstoffarmen, staunassen Böden Konkurrenzvorteile habe, spreche dafür, dass diese Baumart einen deutlicheren Pioniercharakter habe als die Traubeneiche.

2.1.2 Unterschiede hinsichtlich ihrer Verbreitung aufgrund der klimatischen Ansprüche

Abbildung 5 stellt die natürliche Verbreitung von Trauben- und Stieleiche gegenüber. Beide Arten treten demnach sympatrisch auf, wobei die Stieleiche ein insgesamt deutlich größeres Verbreitungsgebiet hat. Aufgrund der weniger in den Norden und Osten reichenden natürlichen Verbreitungsgrenzen, kann laut KRAHL-URBAN (1959, 46) „...nur der Schluß gezogen werden ... , dass die Traubeneiche kälteempfindlicher als die Stieleiche ist.“ Zu den Wärmeansprüchen bzw. zur Forstgefährdung der beiden Eichenarten finden sich sehr unterschiedliche Literaturquellen. BARTSCH UND DENGLER (1992, 170) gehen von „...keine(r) ausgeprägten Differenzierung in ihren *Wärmeansprüchen* [in Mitteleuropa]“ aus und konstatieren, dass sich „bisher keine klaren Unterschiede zwischen beiden Arten“ hinsichtlich der Spätfrostgefährdung fanden (ebenda, S. 170). Die Schweizer Kollegen (PROFESSUR FÜR WALDBAU, PROFESSUR FÜR FORSTSCHUTZ & DENDROLOGIE 1993) dagegen bezeichnen beide Arten als „wärmebedürftig“, wobei die Stieleiche weniger empfindlich gegenüber Winterkälte sei. Auch gegenüber Spätfrost sei die Traubeneiche „empfindlich“, die Stieleiche jedoch nur „mässig gefährdet“. Die „Temperaturzahl“, welche das (konkurrenzbeeinflusste!) Vorkommen einer Art entlang einer neunteiligen Wärmeskala im westlichen Mitteleuropa einschätzt, ist laut ELLENBERG ET AL. (2003) für beide Eichenarten gleich. Sie liegt für Trauben- und Stieleiche bei sechs, d.h. zwischen den Stufen fünf („Mäßigwärmezeiger“) und sieben („Wärmezeiger“). ELLENBERG UND LEUSCHNER (2010, 126, Tab. 4-11.) gehen für beide Eichenarten von einer „mittelmäßigen“ Empfindlichkeit gegenüber Spätfrost im Frühjahr aus, unterscheiden jedoch hinsichtlich der Empfindlichkeit gegenüber Winterfrösten. Die Stieleiche habe hier eine „mittelmäßige“ Empfindlichkeit, die Traubeneiche jedoch eine „große“ Empfindlichkeit. RITTERSHOFER (2004, 27) spricht dagegen der Stieleiche eine „hohe“, der Traubeneiche jedoch lediglich eine „mittlere“ Spätfrostgefährdung zu, ohne auf die Winterfrostgefährdung näher einzugehen.

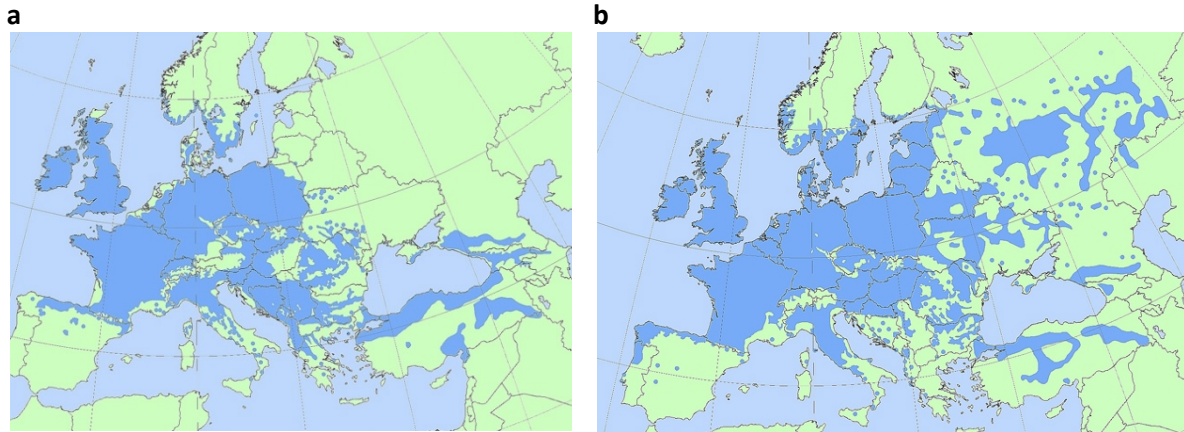


Abbildung 5: Natürliche Verbreitung der Traubeneiche (links) und der Stieleiche (rechts)

Quelle: (EUFORGEN 2009)

Das natürliche Verbreitungsgebiet der Stieleiche reicht sehr viel weiter nach Osten und weiter nach Norden als das der Traubeneiche.

Auch die Klimahüllen von KÖLLING ET AL. (2007) bestätigen sowohl die größere Temperaturamplitude der Stieleiche, welche von ca. 0.5 bis ca. 13.5°C Jahresdurchschnittstemperatur reicht, im Vergleich zur Traubeneiche, deren Amplitude von ca. 4.5 bis ca. 13.5°C reicht, als auch die etwas größere Amplitude bezüglich der Jahresniederschlagssumme. Diese reicht bei der Stieleiche von ca. 300 mm bis ca. 1200 mm, bei der Traubeneiche von ca. 450 mm bis ca. 1300 mm. Auf die methodischen Schwächen der Klimahüllen wurde bereits in Kapitel 1.2 eingegangen.

2.1.3 Unterschiede hinsichtlich ihrer Trockenstress-Sensitivität

Ob das Vertrauen in die beiden Eichenarten, welches im Rahmen von Waldumbau- oder Durchforstungsmaßnahmen gesetzt wird, gerechtfertigt ist, kann hinterfragt werden. Hinweise könnten z.B. die Ergebnisse der terrestrischen Waldschadensinventur geben. Im Jahr 2013 lag der mittlere Blattverlust für die Eichen in Baden-Württemberg bei 29.7 % und damit zwar etwas niedriger als im vorhergehenden Jahr, jedoch höher als bei allen anderen Hauptbaumarten (Fi: 18.5 %, Ta: 23.1 %, Kie: 22.7 %, Bu: 29.1 %) (MEINING ET AL. 2013). Gerade die Eichen werden jedoch regelmäßig von Frostspanner, Eichenwickler oder Schwammspinner befallen und können den Blattverlust über die Bildung von Johannistrieben zumindest teilweise kompensieren. Die Einschätzung des Gesundheitszustandes anhand des Blattverlustes wird deshalb für diese Baumart von manchen Autoren kritisch gesehen (ROLOFF 2001, 39ff.). Andererseits nahmen die Schäden an den Eichen ab Mitte der 1980er Jahre derartig zu, dass von der „Eichenkomplexkrankheit“ gesprochen wurde. Als prädisponierende Faktoren für die Eichenkomplexkrankheit wurde von verschiedenen Autoren eine vorausgehende Trockenheit - eventuell in Kombination mit Frostschäden in den folgenden Wintern - erkannt (BRESSEM, VON STEEN A. 2012; SCHLAG 1994). LEVY ET AL. (1992) weisen darauf hin, dass in Frankreich die Stieleiche auf schlecht wasser- und nährstoffversorgten Böden nach Trockenperioden stärker von Radialzuwachseinbußen betroffen sei als die Traubeneiche und bringen dies in Verbindung mit der „Eichenkomplexkrankheit“. Deshalb sollte nach Meinung der Autoren die Stieleiche nur auf den besseren Standorten angebaut werden. GAERTIG ET AL. (2001) wiederum weisen in 38 baden-württembergischen Eichenbeständen nach, dass die Dichteverteilung der Feinstwurzeln mit zunehmender Tiefe abnimmt, wenn im Oberboden der Gasaustausch gestört ist. Sie gehen davon aus, „...das die eichentypische Eigenschaft, tiefe Bodenhorizonte zu erschließen und in Trockenzeiten Wasser aus diesen Bodenschichten zu beziehen ..., verloren geht, wenn sich die Gasschleuse Oberboden verengt.“ (ebenda, S. 1346). Die Autoren zeigen einen Zusammenhang zwischen Feinreisigverlust und Gasdiffusionskoeffizient im Oberboden auf, können jedoch keinen Unterschied zwischen Trauben- und Stieleichen feststellen.

Die Frage, welche der beiden Eichenarten trockenstresstoleranter ist, scheint länderspezifisch unterschiedlich beantwortet zu werden. In Frankreich und der Schweiz gilt die Traubeneiche tendenziell als trockenstresstoleranter (BERGÈS ET AL. 2005, 392; TIMBAL, AUSSENAC 1996, 655), was durch verschiedene Untersuchungen bestätigt wurde. Dendrochronologisch wurde dies u.a. durch LÉVY ET AL. (1992), BECKER ET AL. (1994) oder PONTON ET AL. (2001) gezeigt; in experimentellen Untersuchungen mit der Analyse von wachstumsspezifischen oder physiologischen Parametern von COCHARD ET AL. (1992), FONTI ET AL. (2013) oder AREND ET AL. (2011) (vgl. hierzu die Ausführungen in den Kapitel 2.4.3, 2.5.2, 2.6.2). Auch das Eichensterben (oak decline) wird in Frankreich in Verbindung mit der Trockenresistenz der beiden Baumarten gebracht. So folgern LANDMANN ET AL. (1993), dass das Eichensterben in Frankreich in den 1980er und 1990er Jahren aufgrund der höheren Anfälligkeit der Stieleiche gegenüber Trockenstress ausgelöst wurde und fordern, die Traubeneiche wieder auf trockenheits-gefährdeteren Standorten einzubringen. Allerdings ist die Feststellung, dass die Traubeneiche als trockenstress-toleranter gilt auch in Frankreich nicht unumstritten oder noch relativ neu. So folgern BREDÁ ET AL. (1993) nach einer vergleichenden Studie zur stomatäre Leitfähigkeit und Transpiration von Stiel- und Traubeneiche in einem ca. 30jährigen Bestand bei Nancy: "...we have concluded that the 2 studied species of oaks are water stress tolerant, and that no major difference between both exists under natural conditions." (ebenda, S. 580). Auch nach den physiologischen Untersuchungen von EPRON UND DREYER (1993) bezeichnen diese die Unterschiede zwischen Stiel- und Traubeneiche in ihrer Reaktion auf Trockenstress als gering. Beide Arten hätten die Fähigkeit während Trockenereignissen eine hohe Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit zu erhalten und eine geringe Anfälligkeit gegenüber Luftembolien. Die effizientere spezifische Wassernutzung der Traubeneiche könnte allerdings zu deren Konkurrenzvorteilen auf trockeneren Standorten gegenüber der Stieleiche beitragen.

Verschiedene Autoren definieren die Trockenstress-Toleranz von Baumarten verbal oder in Tabellenwerken aufgrund von Erfahrungswerten, vegetationskundlichen Untersuchungen oder mit Bezug auf verschiedene wissenschaftliche Arbeiten. In Tabelle 1 werden einige Beispiele mit den entsprechenden Hintergrundinformationen für die beiden Eichenarten aufgelistet.

In der Summe deuten die Literaturangaben und die Einschätzungen von Experten darauf hin, dass die Traubeneiche, zumindest in Baden-Württemberg, die trockenheitsresistentere Baumart der beiden Eichenarten ist, wobei die unterschiedlichen Standortsansprüche der beiden Baumarten und deren genetische Ausstattung sicherlich eine große Rolle spielen. Die Einschätzung zur „Dürretoleranz“ der Stieleiche bei ELLENBERG UND LEUSCHNER (ELLENBERG, LEUSCHNER 2010) resultiert aus der östlichen Arealverbreitung der Art bis an den Ural und an den Rand der Steppe. Die Traubeneiche dringt dagegen nur bis in die Westukraine vor und fehlt im kontinentalen Klima. Daneben sind in Norddeutschland auch Stieleichen-Bestände auf trockenen Sandböden bekannt (pers. Mitteilung von CH. LEUSCHNER, 08.08.2014). D.h. die Trockenstress-Toleranz der beiden Eichenarten ist vermutlich in unterschiedlichen geographischen Regionen, abhängig von der Differenzierung der Ökotypen, verschieden zu beurteilen. WAGNER (2013) leitet aus der buchenähnlichen Verbreitung der Traubeneiche eine im Vergleich zur Stieleiche geringer ausgeprägte Anpassungsfähigkeit der Traubeneiche im Hinblick auf den Klimawandel ab. Er betont mit Bezug auf ELLENBERG UND LEUSCHNER (1996), dass die Stieleiche "nicht ausschließlich im Auenwald vorkommt, sondern auch auf ärmeren Sandstandorten. (ebenda, S. 7)."

Für den südwestdeutschen Raum wird aufgrund der Verbreitung der beiden Eichenarten in der aktuellen, aber auch in der potenziellen natürlichen Vegetation von einer größeren Trockenstresstoleranz der Traubeneiche ausgegangen. REIDL ET AL. (2013) verorten die Traubeneiche in der potenziellen natürlichen Vegetation Baden-Württembergs z.B. in der kollinen bis submontane Höhenstufe am Westabfall des Schwarzwaldes und die Stieleiche als Baumart der Hartholzau mit i.d.R. vorhandenem Grundwasseranschluß z.B. im Rheintal. Deshalb und aufgrund

der Tatsache, dass sie in der potenziellen natürlichen Vegetation die in Mischung zur Buche weiter verbreitete Eichenart darstellt (vgl. Kapitel 3.1.1), wurde sie in der vorliegenden Arbeit als Untersuchungsbaumart ausgewählt.

Tabelle 1: Beispiele für die unterschiedliche Beurteilung der Trockenstress-Toleranz von Trauben- und Stieleiche aufgrund von Tabellenwerken und verbalen Beschreibungen zu den Standortsansprüchen von Baumarten

	trockenstress-tolerantere Art
JAHN (1991) stellt die Standortsansprüche der europäischen Baumarten gegenüber und führt u.a. den Faktor „Ansprüche an die Wasserversorgung“ (water requirement) auf (ebenda, S. 401, Table 13.5. Auch dieser Begriff entspricht nicht der in dieser Arbeit verwendeten Definition von „Trockenheits-Toleranz“ (vgl. Begriffe und Definitionen, Seite 6ff), die Einstufung von JAHN soll aber der Vollständigkeit halber trotzdem hier genannt werden. In der 3stufigen Skala (1: tolerating aridity; 2: medium; 3: needing a high supply of water with good aeration), wird die Traubeneiche der Stufe 2, die Stieleiche jedoch als „trocken-stress“, bzw. „ariditäts-toleranter“ mit 3 eingestuft.	SEi
Experten aus der Schweiz (PROFESSUR FÜR WALDBAU, PROFESSUR FÜR FORSTSCHUTZ & DENDROLOGIE 1993) vergeben hinsichtlich einer „Gefährdung bei Wasserstress und Trockenheit“ eine verbale Klassifizierung. Die Stieleiche wird von ihnen mit „mässig empfindlich“ und die Traubeneiche mit „wenig empfindlich“ gegenüber der genannten Gefährdung beschrieben.	TEi
OTTO (1994) definiert die ökologische Potenz mitteleuropäischer Baumarten anhand einer Tabelle mit unterschiedlichen Kriterien zu den Standortsansprüchen, den Art-Eigenschaften und Gefährdungen (ebenda, Seite 73, Tab. 4). Bezüglich der Standortsansprüche definiert er die Trockenheits-Toleranz als „Anspruchslosigkeit an die Wasserversorgung und Dürre-resistenz“ (ebenda, S. 74) und damit anders als der Begriff in dieser Arbeit (vgl. Begriffe und Definitionen, Seite 6ff) verwendet wird. Auf einer fünfteiligen Skala (1=sehr niedrig bis 5 = sehr hoch) beurteilt er die Traubeneiche als „trockenheits-toleranter“ (4) als die Stieleiche (3).	TEi
BRZEZIECKI UND KIENAST (1994) beurteilen auf einer fünfteiligen Skala (IDRT, Appendix 1: 1= hoch, 5 = niedrig) die Trockenstress-Resistenz von Traubeneiche etwas besser (2) als diejenige der Stieleiche (3). Letztlich gehen deren Einschätzungen aber lediglich auf zwei Quellen, nämlich LEIBUNDGUT (1984) und PUCHALSKI (1972) zurück.	TEi
Von RITTERSHOFER (2004, 26) wird die „Trockenresistenz“ der beiden Eichenarten gleich mit „hoch“ beurteilt.	keine
NIINEMETS ET AL. (2006) beurteilen auf einer sechsteiligen Skala mit 0 = sehr intolerant und 5 maximale Toleranz (App. A), die Traubeneiche mit 3.02 ± 0.15 (Skalenwert \pm Standardfehler) und die Stieleiche mit 2.95 ± 0.31 , d.h. es besteht laut dieser Einteilung praktisch kein Unterschied zwischen den beiden Eichenarten. Die Skalierung von NIINEMETS ET AL. stützt sich dabei auf der Verbreitung der Arten und deren physiologisches Potenzial, wobei hinsichtlich der Verbreitung die Kennzahlen: Jahresniederschlagssumme, Verhältnis des Niederschlags zur potenziellen Evapotranspiration und Länge der Trockenperiode ausgewertet werden. Die so erstellte Reihenfolge wurde anhand der Zeigerwerte von ELLENBERG (2003), sowie den Aussagen zur Dürre-Toleranz bei verschiedenen Autoren kalibriert (BRZEZIECKI, KIENAST 1994; ELLENBERG, LEUSCHNER 2010; JAHN 1991; OTTO 1994).	(TEi)
ELLENBERG UND LEUSCHNER (2010, 126, Tab. 4-11) konstatieren in einer sechsteiligen Skala von „sehr groß“ (1) bis „äußerst gering“ (6) der Stieleiche eine „sehr geringe“ (5) Empfindlichkeit gegenüber „Dürrezeiten im Sommer“, der Traubeneiche dagegen eine „mittelmäßige“ (5) Empfindlichkeit. Die Stieleiche wird also als „dürre-resistenter“ angesehen.	SEi

2.2 Die Verläufe von Höhenwachstum und Höhenzuwachs bei Buche und Eiche

2.2.1 Höhenwachstumsverlauf bei Buche und Eiche

Die beiden in dieser Arbeit untersuchten Baumarten sind bezüglich ihres Höhenwachstumsverlaufs typische Vertreter von Licht- und Schattbaumarten. Als typische Lichtbaumart zeigt die Eiche im Höhenwachstumsverlauf einen schnellen Start in der Jugend, aber auch das rasche Nachlassen der Höhenzuwächse im fortgeschrittenen Alter (MITSCHERLICH 1970). Die Buche dagegen startet im Höhenwachstum verhaltener, kann jedoch im späteren Alter ihre Krone noch weiter ausbauen (BÖSCH 2002; HAYWOOD 2002; VANCK, SPIECKER 2004). Laut BURSHEL UND HUSS (2003) kulminiert der Höhenzuwachs der Eichen im Alter von ca. 30 Jahren, wohingegen der Höhenzuwachs der Buche erst im Alter von ca. 45 Jahren seinen maximalen Wert erreicht. Daraus resultiert ein, je nach Standort und Bonität, sehr unterschiedlicher Zeitpunkt zu dem die Eiche von der Buche überwachsen oder zumindest in der Höhe eingeholt wird. So sind in realen Waldbeständen alle möglichen Übergangsformen zu finden: zwischen Einwachsen von bislang unterdrückt stehenden Buchen in die Eichenkronen entweder von unten oder von der Seite, bis hin zum Überwachsen und nachträglichen Ausdunkeln der Eichen.

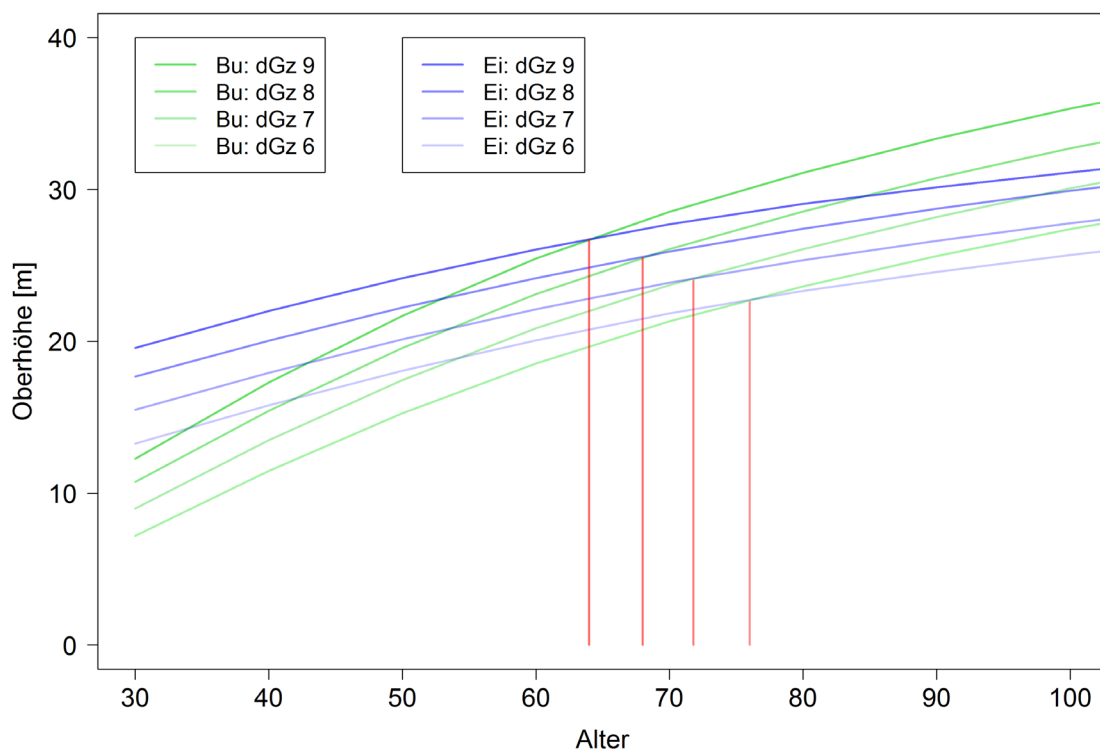


Abbildung 6: Höhenwachstumsverlauf von Buchen und Eichen nach den Ertragstafelwerten.

Zugrundegelegt wurden die Oberhöhenverläufe nach der Eichen-Ertragstafel von JÜTTNER (1975) und der Buchen-Ertragstafel von SCHÖBER (1975), angepasst jeweils auf die Verhältnisse in Baden-Württemberg (MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM 1993). Die vertikalen roten Linien kennzeichnen den Zeitpunkt, zu dem die Eiche von der Buche bei gleichen Bonitäten überwachsen werden würde.

Im Konstrukt der Ertragstafeln holen die Buchen die Eichen im Alter zwischen ca. 60 und ca. 80 Jahren ein. Je schlechter der Standort desto später erreichen die Buchen die Höhe der Eichen.

Nach den Höhenwachstumsgängen gängiger Ertragstafeln werden die Eiche im Alter von ca. 60 bis 80 Jahren von der Buche eingeholt (vgl. Abbildung 6), vorausgesetzt beide Baumarten haben am entsprechenden Standort dieselbe Bonität. In Baden-Württemberg wird die Wuchsleistung der Eiche in Buchen-Eichen-Mischbeständen auf mittleren Standorten in der Regel mit einer

Bonitätsstufe geringer als diejenige der Buche eingeschätzt. Die unterschiedlichen Wuchseleistungen der beiden Baumarten in Baden-Württemberg werden auch aus den Angaben zum periodischen Zuwachs der beiden Baumarten zwischen den beiden Bundeswaldinventuren (1987 - 2002) deutlich. In diesem Zeitraum hat die Buche einen Zuwachs von 12.90 m³/Jahr und ha über alle Eigentumsarten hinweg, die Eiche von 8.43 m³/Jahr und ha geleistet (KÄNDLER ET AL. 2005). Diese Zahlen erlauben selbstverständlich keinen direkten Vergleich der Baumarten, da hierbei neben dem Leistungsvermögen der Baumarten auch andere Aspekte wie z.B. die Altersverteilung und das bestockte Standortsspektrum einfließen. Laut aktueller Forsteinrichtungsstatistik wird die Buche im öffentlichen Wald von Baden-Württemberg mit einer absoluten Ertragsklasse (dGz₁₀₀) von knapp 8 Vfm/Jahr und ha, die Eiche mit etwas mehr als 6 Vfm/Jahr und ha bonitiert (Joos 12. November 2013). Tatsächlich dürfte der Zeitpunkt des Überwachsens also deutlich früher als in Abbildung 6 dargestellt erfolgen.

2.2.2 Höhenzuwachs bei Eiche und Buche im Jahresverlauf

Zum jährlichen Verlauf des Triebblängenwachstums existieren, aufgrund der messtechnischen Schwierigkeiten in größerer Höhe, kaum Untersuchungen, die über das Alter von ca. 15 Jahren bei den untersuchten Individuen hinausgehen. Für Buche und Eiche bieten die Untersuchungen von BURGER (BURGER 1926) und SPÄTH (SPÄTH 1912) an Jungpflanzen bei Zürich und Berlin die detailliertesten Anhaltspunkte. Der erste Triebblängen-Wachstumsschub findet bei jungen Buchen demnach von Anfang Mai bis längstens Mitte Juni statt. Der zweite Wachstumsschub (Johannistrieb) erfolgt von Ende Juni bis Mitte Juli. Junge Eichen zeigten an denselben Standorten einen ersten Wachstumsschub zwischen der zweiten und der vierten Maiwoche, sowie einen zweiten Schub in den ersten beiden Juliwochen (SPÄTH) oder in den letzten beiden Juliwochen (BURGER). Auch LONGMANN UND COUTTS (1974, 194) gehen in ihrer umfassenden Literaturstudie zum Wachstumsverhalten der Eichen in Mitteleuropa von einer kurzen, zwei bis drei Wochen andauernden, ersten Triebblängenwachstumsphase aus. Nach vier bis sechs Wochen Ruhepause folge im Allgemeinen ein weiterer Trieb, der in Mitteleuropa um die Sommersonnenwende (20.-22. Juni) gebildet wird. Im August könne laut diesen Autoren ein weiterer Trieb, gelegentlich sogar im Oktober ein vierter Trieb gebildet werden. Nach LAVARENNE-ALLARY (1965, zitiert in COLLET ET AL. 1997) sind bei der Traubeneiche unter kontrollierten Bedingungen an Jungpflanzen bis zu 16 sukzessive Wachstumsschübe pro Jahr möglich, unter natürlichen Umständen seien bei günstigen Bedingungen vier bis fünf, unter ungünstigen Bedingungen ein bis zwei Wachstumsschübe die Regel.

Eine Übertragung des jährlichen Höhenwachstumsverhaltens von Jungpflanzen auf ältere Bäume ist jedoch nicht ohne weiteres möglich (WAREING 1956). Mehrere Autoren gehen von einer kürzeren jährlichen Periode des Triebblängenwachstums bei älteren Bäumen im Vergleich zu den Jungpflanzen aus (KOZLOWSKI ET AL. 1991, BORCHERT 1976, WAREING 1956 für *Robinia pseudoacacia* sowie FORWARD UND NOLAN 1964 für *Pinus resinosa*). REICH (1980) stellt dagegen in seiner Untersuchung an Amerikanischer Weißeiche (*Quercus alba*) eine kürzere jährliche Triebblängen-Wachstumsperiode bei Jungpflanzen im Vergleich zu etwas älteren Bäumen fest. Auch geht BORCHERT (1975), nach seinen Untersuchungen an amerikanischen Sumpfeichen (*Quercus palustris*) davon aus, dass ältere Eichen eine geringere Anzahl und Dauer von Wachstumsschüben aufweisen, als jüngere. Dazu schreibt er wörtlich: „...i.e. the number of seasonal flushes and the duration of periods of indeterminate shoot growth always decline with increasing size of a tree.“ (ebenda, S. 157). Diese Ansicht bestätigen auch LONGMANN UND COUTTS (1974, 194), sie erläutern, dass Sämlinge und unter 4jährige Stockausschläge häufigere Wiederaustriebe während des Jahres zeigen, während über 10jährige Pflanzen maximal zwei Wachstumsschübe im Jahr hätten.

Unumstritten scheint in der wissenschaftlichen Literatur jedoch die Abhängigkeit des Triebblängenwachstums vieler Baumarten von den im Vorjahr eingelagerten Reservestoffen und damit der Witterung im Vorjahr zu sein (vgl. hierzu Kapitel 2.4).

2.3 Dickenzuwachs bei Buche und Eiche im Jahresverlauf

2.3.1 Allgemeine Anmerkungen zur Untersuchungen des intra-annualen Dickenzuwachses

Messungen zum intra-annualen Dickenzuwachs waren lange Zeit auf das periodische Ablesen von Umfangmaßbändern begrenzt. Bereits Anfang des letzten Jahrhunderts wurden die ersten analogen Dendrometer mit Papierrollen entwickelt, davor waren schon sogenannte Meßuhren im Einsatz. Erst mit der Einführung von elektronischen Messgeräten und digitalen Speichermetoden konnten kürzere zeitliche Auflösungen erfasst werden, wobei zu Beginn (ca. 1980er) diese nur an Orten mit permanenter Stromversorgung möglich waren. Spätestens seit den 1990er Jahren war die Übertragung per Modem und Mobilfunktechnik möglich, so dass mit Batterien gearbeitet werden konnte, was die Auswahl der Untersuchungsstandorte sehr vereinfachte. Ein Problem bei zeitlich hochaufgelösten Messungen zum Radialzuwachs stellen die einem Tagesrhythmus folgenden Quellungs- und Schwindungsprozesse im Stamm und die Aufteilung der Wachstumsprozesse auf Holz (Xylem) und Rinde (Phloem) dar. Für die Buche scheint inzwischen abgesichert zu sein, dass das Wachstum allmählich mit den Phloemzellen beginnt und die ersten Xylemzellen erst später, dann aber sehr rasch gebildet werden (HAUSER 2003, 172).

Beginn, Ende und Geschwindigkeit (=Rate) des eigentlichen Wachstumsprozesses können deshalb detailliert nur mit der unterstützenden Entnahme von Mikrobohrkernen oder Pinning-Methoden beschrieben werden.

Im Folgenden wird zunächst auf Untersuchungen bei der Buche, anschließend bei Eiche und zum Schluss auf beide Baumarten vergleichende Untersuchungen eingegangen.

2.3.2 Intra-annualer Dickenzuwachs bei der Buche

POPESCU ET AL. (1968) misst in einem 45 bis 75jährigen Bestand bei Brasov (Rumänien, Jahresdurchschnittstemperatur: 7.8°C, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 648 mm, Zeitraum: 1950-2000, Worldclim-Daten, vgl. hierzu Kapitel 1.2) im Jahr 1966 mittels Messuhren die Radialzuwachsveränderung im wöchentlichen Rhythmus an 20 Buchen und entnimmt zusätzlich Holzproben. Als Beginn des Dickenwachstums, welcher mit der Blattentfaltung zusammenfällt, gibt er den Zeitraum zwischen dem 14. und dem 30. April an, der Höhepunkt sei Ende Juli erreicht und in der ersten Hälfte des Monats September sei das Dickenwachstum abgeschlossen gewesen. Für die Auswertung teilt er das Kollektiv der gemessenen Bäume bei einem BHD von 20 cm und stellt fest, dass bei den niedrigeren Durchmesserklassen (=jüngere Bäume) der Radialzuwachs deutlich früher im Jahr kulminiert als bei den stärkeren Durchmesserklassen.

Inwiefern die soziale Stellung entscheidend für den jährlichen Verlauf des Dickenwachstums von Buchen ist, wurde ebenso anhand von Dendrometer-Untersuchungen untersucht. So analysiert z.B. KRAMER (1982) das Durchmesserwachstum an 24 Bäumen in einem ca. 120jährigen Buchenbestand im Solling (mittlere Jahresdurchschnittstemperatur: 6.5°C, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 1066 mm). Die wöchentlichen Messungen wurden mittels Arnberg-Mikrodendrometer in den Jahren 1969 und 1968 durchgeführt. Zuwachsbeginn und Zuwachsende werden nach der Methode von HENHAPPEL (1965) auf die Zeitpunkte, an denen 5 bzw. 95 % des gesamten jährlichen Radialzuwachses erreicht sind, festgelegt. KRAMER stellt fest, dass 1968 der Beginn des Dickenwachstums zwischen dem 23. April und dem 13. Juni lag und das Wachstumsende zwischen dem 14. Juli und dem 29. August. Dabei begann der Radialzuwachs der stärkeren Durchmesserklassen (BHD > 41 cm) deutlich früher, d.h. zwischen dem 23. April und dem 9. Mai, als bei den schwächeren Durchmesserklassen (BHD 26 – 41 cm). Das Wachstumsende war jedoch nicht vom Durchmesser beeinflusst. Obwohl in beiden Jahren (1968 und 1969) an den untersuchten Buchen der gleiche mittlere Radialzuwachs festgestellt wurde, war der Verlauf während der Wachstumsperiode jeweils sehr unterschiedlich. Der Wachstumsverlauf konnte an

dem Standort am deutlichsten durch die Höhe der Globalstrahlung und der Lufttemperatur, nicht aber durch die Niederschlagsmenge erklärt werden. Für das Jahr 1968 stellt KRAMER einen engen Zusammenhang zwischen Wachstumsdauer und Radialzuwachs der einzelnen Bäume fest ($r=0.75$), 1969 kann er diesen Zusammenhang jedoch kaum mehr nachweisen ($r=0.42$). Auch bei Messungen in einem 92jährigen Buchenbestand im Göttinger Wald (mittlere Jahresdurchschnittstemperatur: 7.8°C , mittlere jährliche Niederschlagssumme: 680 mm) mit denselben methodischen Ansätzen an 90 Buchen in den Jahren 1980 und 1981 können KRAMER UND KÄTZSCH (1982) die Ergebnisse aus der früheren Untersuchung bestätigen. Das Dickenwachstum begann 1981 demnach zwischen dem 12. April (Kraft'sche Klasse 4) und der ersten Maiwoche (Kraft'sche Klasse 1 und 2) (KRAFT 1884). Zuwachsende war am 12. Juli für die beherrschten Bäume und ca. einen Monat später für die (vor)herrschenden Bäume. Insgesamt begann also der Buchenunterstand ca. 2 Wochen früher mit dem Stärkenwachstum „und erreicht einen Monat vor den Bäumen des Oberstandes 50 % der Gesamtveränderung“ (ebenda, S. 89). Als Erklärung dafür wird angeführt, dass der Unterstand zu Beginn der Vegetationsperiode aus den im Vorjahr gespeicherten Vorräten neue Holzzellen anlegen kann, deren Produktion aber einstellen müsse, wenn diese Vorräte aufgebraucht sind. Die Autoren der o.g. Untersuchung zeigen auch, dass an dem Standort im Solling, die täglichen Zuwachswerte positiv von hohen Temperaturen beeinflusst werden, wenn insgesamt auch ausreichend Niederschläge gefallen sind.

HAUSER (2003) ermittelt mittels Dendrometer-Messungen an 54 Buchen auf der Schwäbischen Alb (Möhringen, mittlere Jahresdurchschnittstemperatur: $6 - 7^{\circ}\text{C}$, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 800 - 1000 mm) die Periode des Dickenwachstums in den Jahren 2001 und 2002. Sie greift auf Näherungswerte zurück, um Beginn und Ende der Wachstumsperiode festzulegen, d.h. als Radialzuwachsbeginn wurde das Datum angenommen, an dem 10 % der Radialzuwachsveränderung erfolgt ist und als Ende das Datum an dem 95 % der Radialzuwachsveränderung erfolgt ist. Als 100 % wird der Radialzuwachswert angenommen, der bis zum 30. September des jeweiligen Jahres stattgefunden hat. Nach diesen Definitionen hat der Radialzuwachs an allen untersuchten Bäumen in den Jahren 2001 und 2002 zwischen dem 10. und dem 30. Mai begonnen, also deutlich nach der Blattentfaltung die 2001 bereits am 9. Mai stattgefunden hatte. Das Ende des Radialzuwachses war dagegen weniger homogen und lag 2001 zwischen dem 27. Juli und dem 29. August und 2002 zwischen dem 17. Juli und dem 4. September. Anhand von wöchentlich entnommenen Mikrobohrkernen ermittelt HAUSER an einem Teilkollektiv von 18 Bäumen außerdem den Beginn der Zellteilung des Kambiums im Jahr 2001. Diese begann mit stark unterschiedlicher Geschwindigkeit zwischen dem 9. und dem 22. Mai, wobei keine Stratifizierung anhand von Exposition oder sozialer Klasse möglich war. Als Ende der Zellteilungs- und Zellausdehnungsaktivität hat HAUSER anhand der Mikrobohrkerne den Zeitraum zwischen dem 14. und dem 28. August 2001 ermittelt. HAUSER hält aufgrund methodischer Schwierigkeiten bei der Präparation der Mikrobohrkerne einen früheren Beginn und ein früheres Ende des Dickenwachstums jedoch für möglich (ebenda, S. 171). HAUSER stellt einen signifikanten Einfluss des waldbaulichen Eingriffs auf das Ende des Radialzuwachses im Jahr fest. Je stärker der Durchforstungseingriff war, desto länger dauerte der Radialzuwachs im Jahr an. Auch die soziale Stellung hatte einen signifikanten Einfluss auf das Ende des Radialzuwachses. „Herrschende“ Bäume (KRAFT 1884) beendeten ihren Radialzuwachs signifikant später als „gering mitherrschende“. „Vorherrschende“ Bäume lagen zwischen den beiden vorgenannten Kollektiven.

PRISLAN ET AL. (2013) analysieren die Xylem- und Phloemproduktion von jeweils sechs (mit)herrschenden ca. 100jährigen Buchen an zwei Standorten in Slowenien, Menina planina auf 1200 m Meereshöhe und Panška reka auf 400 m Meereshöhe, anhand von Mikrobohrkernentnahmen im wöchentlichen Rhythmus in den Jahren 2008 bis 2010. Erwartungsgemäß begann die Zellproduktion des Xylems am niedriger gelegenen Standort früher, kulminierte früher und hielt länger an. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass am niedriger gelegenen Standort

die Ringbreite vor allem von der Länge der Wachstumsperiode und nicht von der Zellproduktionsrate abhängt, während dies am höher gelegenen Standort umgekehrt sei.

An 72 Buchen auf zwei unterschiedlich exponierten Standorten in unmittelbarer Nachbarschaft auf der Schwäbischen Alb (Möhringen) zeigt VAN DER MAATEN (2013), dass in Trockenjahren die Radialzuwachsdauer bei Buchen deutlich verkürzt ist (betrachteter Zeitraum 2001 bis 2006).

2.3.3 Intra-annueller Dickenzuwachs bei der Eiche

Dendrometer-Untersuchungen an Eichen sind aufgrund der grobborkigen Rindenstruktur offensichtlich schwieriger umzusetzen, deshalb sind entsprechend wenige Forschungsergebnisse publiziert. ZWEIFEL ET AL. (2006) haben an zwei südexponierten Standorten im Wallis (Salgesch auf 975 m üNN und Jeizinen auf 1270 m üNN, jeweils ca. 600 mm durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme) Dendrometer-Messungen an insgesamt elf Flaumeichen, fünf Kiefern und zwei Tannen von 2002 bis 2004 durchgeführt. 2003 wurden an acht Terminen während der Vegetationsperiode außerdem an zwei Bäumen jeder Baumart Mikrobohrkerne entnommen. Nach diesen Untersuchungen hat das Dickenwachstum der Flaumeichen im Jahr 2003 ein bis zwei Wochen vor den anderen Baumarten begonnen, wobei an beiden Standorten ca. 25 bis 30 % der Jahrringbreite bereits vor dem Aufbrechen der Knospen gebildet waren. 40 bis 45 % der Jahrringbreite waren erreicht, als die Blätter voll entfaltet waren. Der frühe Radialzuwachs der untersuchten Eichen wird von den Autoren in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von anderen Untersuchungen durch die Notwendigkeit begründet, neue Leitgefäße zu bilden, damit die jungen Blätter mit genügend Wasser versorgt werden können. ZWEIFEL ET AL. weisen auch darauf hin, dass auf dem flachgründigen, trockenen Standort die Niederschläge im laufenden Jahr einen signifikanten Einfluss auf die Wachstumsraten aller drei untersuchten Baumarten hatten. Sowohl bei den Niederschlägen als auch bei den Wachstumsraten wurden für diese Analyse mit einem Mittelwert von zehn Tagen gerechnet.

Eine weitere Studie zum jahreszeitlichen Verlauf des Dickenwachstums wurde anhand von wöchentlich entnommenen Mikrobohrkernen an fünf vorherrschenden, ca. 150jährigen Traubeneichen in Slowenien in der Nähe von Ljubljana (Jahresdurchschnittstemperatur: 9.8°C, durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme: 1409 mm, Zeitraum: 1900 - 2007) im Jahr 2007 durchgeführt (GRIČAR 2010). Das Dickenwachstum von Phloem und Xylem begann an diesem Standort schon vor der ersten Probenentnahme, die Ende März erfolgte. Auch für die Eiche wird hier bestätigt, dass bis in die dritte Maiwoche zunächst eine schnellere Produktion von Phloemzellen erfolgte. Die höchste Produktionsrate an Xylemzellen lag im April/Mai, und in der ersten Augushälfte stellten die Traubeneichen das Dickenwachstum bereits wieder ein.

SCHOBBER (SCHOBBER 1951b) untersuchte im Jahr 1949 das Dickenwachstum von 20 bis 40jährigen Buchen und Eichen und anderen Baumarten in zwei verschiedenen Höhenlagen bei Hann.-Münden (Kattenbühl: ca. 300 m üNN und Steinberg: ca. 500 m üNN). Um die Holzproben an den jeweils fünf Untersuchungsbäumen möglichst schonend entnehmen zu können, entwickelte er einen speziellen Fräskopf. Er zeigt, dass das Dickenwachstum der Eichen unabhängig von der Höhenlage bereits am 24. April 1949 begann, während das der Buche erst gegen Mitte Mai (Kattenbühl) einsetzte, mit einer ca. zweiwöchigen Verzögerung an dem höher gelegenen Standort. Das Dickenwachstum der Eichen war in der ersten (Kattenbühl) bzw. zweiten Septemberwoche (Steinberg) beendet. Das der Buchen am 26. September 1949 (Kattenbühl) bzw. 10. September (Steinberg). Das im Vergleich zu anderen Untersuchungen außergewöhnlich lang anhaltende Dickenwachstum führt SCHOBBER auf den ungewöhnlich warmen Spätsommer des Jahres 1949 zurück. Der höchste Anteil an Dickenzuwachs wurde bei beiden Baumarten am niedriger gelegenen Standort in den Monaten Juni und Juli, am höher gelegenen Standort in den Monaten Juli und August geleistet. Das Zuwachsmaximum wurde von den Eichen Mitte/Ende Juli von den Buchen Ende Juni (Kattenbühl)

bzw. Anfang August (Steinberg) erreicht. Bei allen Baumarten wurde das Maximum am tiefer gelegenen Standort früher erreicht.

2.3.4 Intra-annualer Dickenzuwachs bei Buche und Eiche im Vergleich

Anhand von wöchentlich entnommenen Mikrobohrkernen in Reinbeständen bei Paris (Fontainebleau: Jahresdurchschnittstemperatur: 10.6°C, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 750 mm, 1960-2009) stellen MICHELOT ET AL. (2012) fest, dass der Beginn des Radialzuwachses im betrachteten Jahr (2009) bei Eiche deutlich früher erfolgte als bei den Buchen (30. März vs. 21. April). Die Eichen stellten den Radialzuwachs 2009 allerdings auch deutlich früher im Jahr ein, als die Buchen (24. Juli vs. 12. August). Für alle untersuchten Baumarten (Buche, Traubeneiche, Kiefer) sei, so die Autoren außerdem, der Einfluss der Wachstumsdauer auf die Jahrringbreite entscheidend, nicht die Wachstumsrate.

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass der Xylemzuwachs während der Vegetationsperiode einem sigmoiden Verlauf folgt (HAUSER 2003). Abweichungen von diesem Verlauf sind aber offensichtlich z.B. aufgrund von Trockenjahren möglich, wie VAN DER WERFT ET AL. (2007) in ihrer Untersuchung an Buchen und Eichen im Trockenjahr 2003 und dem Folgejahr zeigen. Sie entnahmen in den Jahren 2003 und 2004 in zweiwöchigem Abstand Mikrobohrkerne in einem ca. 80 jährigen Eichen-Kiefern-Buchen-Mischbestand in den Niederlanden (Jahresdurchschnittstemperatur: 9.5°C, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 760 mm, 1905-2005). An vorherrschenden Buchen (n=3) und Eichen (n=6) zeigten die Autoren, dass beide Arten 2003 etwa zur gleichen Zeit mit dem Radialzuwachs begonnen haben, nämlich zwischen dem 29. April und dem 16. Mai. Für beide Arten stagnierte das Wachstum zwischen Ende Juni und Ende August bzw. kam bei der Eiche Ende August sogar ganz zum Erliegen. Nur die Buche hatte von Mitte September bis Mitte Oktober nochmals einen Wachstumsschub. Dies führte dazu, dass die Eiche im Trockenjahr 80 % ihrer Ringbreite bereits Anfang Juli, die Buche aber erst Mitte September erreicht hatten. Die Autoren betonen in der Diskussion, dass im Gegensatz zur Eiche, die Buche sensitiv und unmittelbar im Radialzuwachs noch im Trockenjahr reagiere. Die Eiche zeige dagegen die Trockenstressreaktion v.a. durch eine verminderte Breite des Frühholzes im Folgejahr (2004).

2.4 Höhenzuwachs bei Buche und Eiche in Abhängigkeit von Witterung und Trockenstress

2.4.1 Allgemeine Zusammenhänge zwischen Höhenzuwachs, Witterung, Baumarten und Alter

Anders als der Radialzuwachs findet der Höhenzuwachs zum überwiegenden Teil sehr früh im Jahr statt. Die Bäume sind deshalb auf die eingelagerten Reservestoffe angewiesen, wobei hierbei sowohl baumartenspezifische als auch altersspezifische Unterschiede zu erwarten sind. Die Reservestoffe, i. W. sind dies die Kohlenhydrate Stärke und Zucker, sind im Baum auf verschiedene Kompartimente verteilt. Neben dem Stamm und den Wurzeln spielen die Knospen und der Bast, während der Vegetationsperiode bei Laubbäumen auch die Blätter und die Saftströme eine Rolle (KOZŁOWSKI ET AL. 1997). Die Schwankungen in der Konzentration der Kohlenhydrate innerhalb des Baumes sind auf täglicher und jahreszeitlicher Ebene eingehender untersucht, als dies auf der Ebene der Lebenszyklen von Bäumen der Fall ist. Dabei wird dem Stamm eine entscheidende temporäre Speicher- und Verteilungsfunktion zugeschrieben, wobei die Speicherung nicht nur als passiver Vorgang bei überproportionaler Photosyntheseleistung zu verstehen ist (SALA ET AL. 2012). Die oberirdischen Kompartimente von Bäumen speichern höhere Anteile der Reservestoffe als die Wurzeln, da deren Anteil an der gesamten Trockenbiomasse überwiegt (PALLARDY, KOZŁOWSKI 2008, 209). Der Anteil der oberirdischen Biomasse von Waldbäumen steigt mit zunehmendem Alter (KOZŁOWSKI ET AL. 1997). Damit ist auch mit einem höheren Anteil eingelagerter Reservestoffe bei älteren Bäumen im Vergleich zu jüngeren Bäumen zu rechnen. Außerdem müssen ältere Bäume

eine sehr viel größere Krone vorsorgen und größere Distanzen zwischen den Speicherorten und den Verbrauchsorten (Blättern) überwinden. Die Bedeutung der Reservestoffe für das Höhenwachstum dürfte also bei älteren Bäumen noch entscheidender sein als bei jüngeren.

Viele Autoren haben mit ihren Untersuchungen den Einfluss der Witterung in den Vorjahren auf das Höhenwachstum der Bäume aufgezeigt. So weisen z.B. ZAHNER UND STAGE (1966) schon 1966 den Einfluss von Wassermangel im Vorjahr auf das Höhenwachstum von *Pinus resinosa*, sowie MAKKONEN-SPIECKER UND EVERS (1993) auf den von Fichten nach. KOZLOWSKI ET AL. (1991) messen der Temperatur des Vorjahres für das Höhenwachstum vieler Baumarten der gemäßigten Klimazone eine generelle Bedeutung bei. Neben der Notwendigkeit zur Nutzung der eingelagerten Reservestoffen, nachgewiesen z.B. von BOSCALLI (1982) an dreijährigen Pflanzen von *Fraxinus ornus*, deutet auch die sich z.B. für die Buche über fast zwei Vegetationsperioden erstreckende Entwicklung der Knospe (ROLOFF 2001, 47) darauf hin, dass das Höhenwachstum mit den Witterungsverhältnissen zumindest des Vorjahres in Verbindung steht.

Auf die Zusammenhänge zwischen der Witterung und der Anzahl bzw. Länge der Johannistriebe bei der Eiche wurde bereits unter Kapitel 2.2.2 hingewiesen.

Im Folgenden werden zunächst die Zusammenhänge zwischen Höhenwachstum und Witterung bzw. Trockenstress bei den Buchen und anschließend bei den Eichen aufgezeigt. Insgesamt überwiegen bei diesen Studien die experimentellen Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen, die im Rahmen von Herkunftsversuchen oder sogenannten „Common Garden Experimenten“ durchgeführt wurden. Wenige observatorische Studien beschäftigen sich mit dem Höhenzuwachs in Naturverjüngungen, wobei hier oft nicht die Trockenstressreaktion sondern die Belichtungsverhältnisse im Fokus stehen. Aufgrund der methodischen Schwierigkeiten beschäftigen sich nur sehr wenige Forschungsarbeiten mit dem Höhenzuwachs an älteren Bäumen, gerade diese sind vor dem Hintergrund der vorliegenden Arbeit jedoch von Interesse.

2.4.2 Höhenzuwachs und Witterung/Trockenstress bei der Buche

Observatorische Studien an Naturverjüngung

CZAJKOWSKI ET AL. (2006) analysieren den Höhenzuwachs an vier- bis sechsjährigen Buchenpflanzen in acht naturverjüngten, über 100jährigen Buchen- und Buchenmischbeständen entlang eines West-Ost-Gradienten von Nord-Ost-Deutschland bis Ostpolen in den Jahren 2003 und 2004. Sie zeigen, dass der relative Längenzuwachs (RI_L), ausgedrückt über das Verhältnis von Längenzuwachs im jeweiligen Jahr zur Höhe der Pflanze vor Beginn des Längenzuwachses, im Jahr 2004 auf allen Flächen in Folge der Trockenheit 2003 deutlich niedriger liegt als im Trockenjahr 2003 ($RI_{L2003} = 0.36$, $RI_{L2004} = 0.17$) Außerdem weisen sie nach, dass der relative Längenzuwachs im Jahr 2003 mit zunehmendem Trockenstress signifikant abnimmt. Die Intensität des Trockenstresses wurde dabei anhand der Dunkelpotenziale, welche zwischen dem 23. Juli und dem 12. August 2003 gemessen wurden, ermittelt. 2004 besteht jedoch kein signifikanter Zusammenhang zwischen Längenzuwachs und Trockenstress-Intensität mehr. In den Beständen wurde auch die Beleuchtungsstärke gemessen. Neben der Trockenstress-Intensität („Wasserstress-Klasse“) hatte auch die Beleuchtungsstärke („DIFFSF = Diffuse Site Factors“) einen signifikanten, aber geringeren Einfluss auf den RI_{L2003} . Der RI_{L2004} war dagegen von der „Wasserstress-Klasse“ und der Kombination aus „Wasserstress-Klasse und DIFFSF“ signifikant beeinflusst. Die Autoren weisen darauf hin, dass der relative Zuwachs des Wurzelhalsdurchmesser sensitiver auf den Trockenstress im Jahr 2003 reagiert habe und führen dies auf die „Hierarchie der Ressourcenallokation bei den Buchenjungpflanzen in Zeiten knapper Wachstumsressourcen“ zurück (ebenda, S. 139).

Experimentelle Untersuchungen

SCHRAML UND RENNENBERG (2000) analysieren das Trieb­längenwachstum von fünf baden­württembergischen Buchen-Provenienzen im Rahmen eines Wasserausschlussversuchs unter Freilandbedingungen. Der Wasserausschluss erfolgte im Jahr 1997, die publizierten Trieb­längenwachstumsdaten beziehen sich lediglich auf dieses Jahr. Während auf der Kontroll- und Behandlungsfläche alle fünf Provenienzen neben der regulären Wachstumsphase von ca. Mitte Mai bis Mitte Juni eine zweite Wachstumsperiode von Mitte Juli bis Mitte August zeigten (Johannistrieb), blieb letztere auf den behandelten Flächen aus. Auf Differenzen im Höhenwachstum zwischen den unterschiedlichen Provenienzen gehen die Autoren nicht weiter ein. Aufgrund der unterschiedlichen Prolin-Konzentrationen in den Blättern gehen sie dennoch davon aus, „... daß bei der Buche Regelmechanismen zur Anpassung an Trockenstress existieren, die in verschiedenen Ökotypen unterschiedlich stark ausgeprägt sind.“ (ebenda, S. 60).

CZAJKOWSKI UND BOLTE (2006) untersuchten das Höhenwachstum an Buchenjungpflanzen von elf verschiedenen Herkunft­en aus drei Regionen (Nordostdeutschland, Westpolen und Zentralpolen) unter kontrollierten Bedingungen. Ein Teil der zweijährigen Pflanzen wurde vom 8. Juli bis zum 18. September 2004 einer künstlichen Trockenheit ausgesetzt, d.h. es erfolgte keine Bewässerung im Gewächshaus. Die behandelten Pflanzen zeigen in ihrem Sprosslängen- und Wurzel­halszuwachs für das Jahr 2004 keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Herkunft­regionen. Auch der Vergleich zwischen Behandlung und Kontrolle ergibt bei keiner Herkunft signifikante Unterschiede, nur bei drei Herkunft­en zeigen die regulär bewässerten Jungpflanzen einen höheren Sprosslängenzuwachs als die der Trockenheit ausgesetzten Pflanzen (ebenda, Abb. 6c). Da die experimentell herbeigeführte Trockenperiode sehr spät im Jahr angesetzt wurde, verwundert dieses wenig aussagekräftige Ergebnis kaum. Etwas plausibler sind die Ergebnisse hinsichtlich des Wurzel­halsdurchmesserzuwachses. Hier zeigen die Kontrollpflanzen von neun der elf Herkunft­en einen höheren Zuwachs als die behandelten Pflanzen, bei zwei Herkunft­en ist dieser Unterschied auch signifikant (ebenda, Abb. 6d). Allerdings lassen sich auch hier keine Reaktionsmuster hinsichtlich der Herkunft­regionen erkennen. Die Autoren gehen aber aufgrund von niedrigeren, modellierten Boden-Matrixpotenzialen und niedrigerem Pflanzenwasserstatus (Dunkelwasser­potenzial), der nordostdeutschen und westpolnischen Herkunft­en im Vergleich zu den zentral­polnischen Herkunft­en, von einer höheren Trockenheitsanpassung letzterer aus.

THIEL ET AL. (2014) untersuchen Buchen-Jungpflanzen von drei sich am Rand des Buchenareals befindlichen Provenienzen (aus Bulgarien, Spanien und Polen) und vergleichen deren Wachstum in einem „Common Garden Experiment“ mit dem von drei deutschen Herkunft­en. Die 2-jährigen Pflanzen wurden 2011 einer Trockenperiode ohne jegliche Bewässerung von 36 Tagen (1. Mai bis 12. Juni) ausgesetzt. Das Höhen- und Durchmesserwachstum desselben Jahres, die Mortalität und die Blattschäden wurden im Untersuchungs­jahr bestimmt. Die der Trockenheit ausgesetzten Pflanzen zeigten bereits 2011 einen gegenüber den Kontrollgruppen signifikant reduzierten Höhenzuwachs (ca. 8.1 cm vs. ca. 13.5 cm), allerdings reagieren die Rand-Provenienzen auf den Trockenstress nicht mit einem einheitlich höheren Höhenzuwachs. So bleiben die bulgarischen Herkunft­en deutlich hinter den polnischen und spanischen zurück, ebenso reagierte nur eine deutsche Herkunft (Johanniskreuz) mit der erwarteten deutlichen Zuwachsreduktion. Von allen untersuchten Parametern zeigt nur die Mortalität das erwartete Reaktionsmuster, d.h. sinkende Mortalitätsraten bei größerer Sommerhitze am Herkunft­standort.

Observatorische Studien in älteren Beständen

Zwei Untersuchungen zum Höhenzuwachs in Buchenaltbeständen mit Bezug zur Witterung legen GRUBER (2001) und GRUBER ET AL. (2003) vor. Leider sind die statistischen Analysen von GRUBER aufgrund einiger statistischen Unzulänglichkeiten (vgl. DITTMAR ET AL. 2005) nur eingeschränkt verwertbar. Im Folgenden werden deshalb lediglich die Aussagen wiedergegeben, die auf

statistisch unzweifelhaften Analysemethoden in dieser ansonsten sicherlich sehr sorgfältig durchgeführten Studie beruhen. An 20 im Winter 1999/2000 geernteten Buchen eines 120 bis 130jährigen Bestandes aus dem Göttinger Wald (mittlere jährliche Niederschlagssumme: 637 mm, 1969-1998) rekonstruierte GRUBER den Längenzuwachs von insgesamt 48 Wipfeltrieben, davon 38 aus dem apikal zentralen und zehn aus dem apikal lateralen Kronenbereich. In 90 % der Fälle kann er den Längenzuwachs anhand der Triebbasisnarben 15 bis 22 Jahre zurückverfolgen und deren richtige Datierung anhand von „Wipfelbasisscheiben“, die aus dem letzten rekonstruierten Längentrieb entnommen werden, bestätigen (GRUBER 2001). Für den Zeitraum 1970 bis 1999 findet GRUBER (2001) einen engen Zusammenhang ($R^2=0.65$) zwischen der Niederschlagssumme des Vorjahres (April bis Juli), sowie des Vorvorjahres (April bis Sept.) und dem Höhenzuwachs im laufenden Jahr, wobei der Einbruch des Höhenzuwachses im Jahr 1977 anhand der aufgestellten linearen Regressionsgleichung mit den genannten beiden Prädiktoren nur unzureichend abgebildet wird (ebenda, Abbildung 1). Eine ähnliche Fragestellung bearbeiten GRUBER ET AL. (GRUBER ET AL. 2003) anhand von elf im November 2001 gefällten ca. 155jährigen Buchen aus dem Stadtwald Zierenberg bei Kassel (mittlere jährliche Lufttemperatur: 7.4°C, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 710mm). Auch für diesen Standort und den Zeitraum 1980 bis 2000 finden die Autoren einen engen Zusammenhang ($R^2=0.68$) zwischen der Niederschlagssumme des Vorjahres (April bis Juni), sowie des Vorvorjahres (April/Mai bis Juni) und dem Höhenzuwachs im laufenden Jahr (ebenda, S. 71 und Tabelle 1).

2.4.3 Höhenzuwachs und Witterung/Trockenstress bei der Eiche

Observatorische Studien an Naturverjüngung

Die Untersuchungen an Naturverjüngung widmen sich ausschließlich der Frage nach unterschiedlichen Beleuchtungsstärken oder der Konkurrenz für die Naturverjüngung durch die krautige Vegetation. Aussagen zur Witterungs- oder Trockenstresstoleranz lassen sich dadurch nicht ableiten, weshalb auf eine detaillierte Auswertung der umfassenden Literatur an dieser Stelle verzichtet wird.

Experimentelle Untersuchungen

Bei den experimentellen Untersuchungen werden meist sowohl wachstumsspezifische, in Form von Höhen- und Dickenwachstum, als auch den Stoffwechsel der Arten kennzeichnende Parameter erhoben und ausgewertet. Überschneidungen mit den in Kapitel 2.6.2 genannten Experimenten und Ergebnissen sind deshalb möglich.

COLLET ET AL. (1997) zeigen an Jungpflanzen von Traubeneiche in einem kombinierten Graskonkurrenz- und Trockenheitsexperiment, dass diese im Höhenwachstum sehr stark reagieren. Während die regelmäßig bewässerten und ohne Konkurrenz aufgewachsenen vierjährigen Pflanzen am Ende des Experiments im Mittel ca. 1.8 m hoch sind, erreichen „behandelte“ Pflanzen lediglich eine Höhe von etwa einem halben Meter (ebenda, Table II, S. 69).

AREND ET AL. (2011) vergleichen die Zuwachsreaktionen von drei Eichenarten (*Quercus robur*, *Quercus petraea* und *Quercus pubescens*) aus jeweils vier Herkunftsgebieten mit unterschiedlichen Niederschlagshöhen aus der Schweiz an dreijährigen Pflanzen im Gewächshaus über drei Jahre. Dieses sogenannte QUERCUS-Experiment setzte die Pflanzen vier verschiedenen Behandlungskonzepten aus: Kontrollgruppe, Trockenstress-Behandlung, Behandlung mit erhöhter Lufttemperatur und Kombination aus Trockenstress und erhöhter Lufttemperatur. Am Ende des dreijährigen Versuchs zeigte sich, dass alle Arten und Herkünfte auf Trockenstress am stärksten mit der Reduktion des Radialzuwachses reagiert haben, welche in neun von zwölf Fällen auch signifikant war (ebenda S. 292, Figure 3). Auch die Reduktion des Höhenzuwachses ist in sieben von zwölf Fällen im Vergleich zur Kontrollgruppe signifikant. BONFILS ET AL. (2013, 47f.) erläutern zwar, dass die Reduktion des Dickenwachstums bei der Stieleiche mit minus 66 % stärker ausfiel,

als bei der Trauben- und der Flaumeiche (minus 61 % und minus 60 %), allerdings variieren die Reduktionsmuster stärker innerhalb der Arten als zwischen den Arten, so dass zur Trockenstress-Sensitivität der Eichen-Arten aufgrund der Analyse der Wachstumsparameter keine Aussage gemacht werden kann. Für die beiden genannten Zuwachsgrößen (ir und ih) wurden auch keine Korrelationen zwischen der Niederschlagshöhe in den Herkunftsgebieten und den Zuwachsreduktionen gefunden. Allerdings haben die Herkünfte von nördlich der Alpen, deren eiszeitliches Refugialgebiet auf dem Balkan liegt, im Vergleich zu denen südlich der Alpen mit einem eiszeitlichen Refugialgebiet in Italien, unabhängig von der Eichen-Art stärker auf den Trockenstress reagiert. Die Autoren vermuten deshalb, dass die unterschiedliche genetische Ausprägung aufgrund der verschiedenen glazialen Refugialgebiete einen höheren Einfluss auf die Trockenstressreaktionen hat, als die Artzugehörigkeit oder die Anpassung an die lokalen Witterungsbedingungen am Herkunftsort. Aufgrund von weiteren Untersuchungen, diese wurden mit Pinning-Methoden und der Entnahme von Stämmchen-Scheiben zur Zellstrukturanalyse an den dann sechsjährigen Pflanzen im dritten Standjahr durchgeführt, relativieren FONTI ET AL. (2013) die vorigen Aussagen von AREND ET AL.. Demnach zeigt die Traubeneiche im Vergleich der drei untersuchten Eichenarten die beste Anpassung an Trockenheit hinsichtlich der Veränderungen in der Zellstruktur. Dies indem sie während der Behandlung die Größe der Gefäße am stärksten reduziert, gleichzeitig die gesamte Gefäßfläche im Jahrring aber am wenigsten verringert. Dadurch ist die Gefahr von Embolien deutlich reduziert. Bei der Behandlungsgruppe „Trockenstress mit Erhöhung der Lufttemperaturen“ hat sich die Gefäßfläche der fünf größten Gefäße im Jahrring bei Traubeneiche demnach um 52 %, bei der Stieleiche um 18 % und bei der Flaumeiche um 17 % im Vergleich zur Kontrollgruppe verringert. Die gesamte Gefäßfläche hat sich bei Traubeneiche lediglich um 44 %, bei der Stieleiche dagegen um 61 % und bei der Flaumeiche um 62 % verringert. Die trockenstressbedingten Veränderungen der Gefäßstruktur bei der Flaumeiche passen allerdings wenig in das Bild, dass diese Art z.B. in Baden-Württemberg nur auf den trockensten Standorten zu finden ist und zeigen vielleicht einmal mehr, dass eine an Aridität angepasste Baumart nicht gleichzeitig auch an periodisch auftretende extreme Trockenereignisse angepasst sein muss. Besser ins Bild passen die physiologischen Untersuchungen von HU ET AL. (2013) ebenfalls an den Eichen des QUERCUS-Experiments. Bei der Analyse der Stressindikatoren im Blatt zeigt die Flaumeiche den geringsten Anteil an Glutathion und Ascorbinsäure. Diese gelten als „Auffangmittel“ für die Sauerstoffradikale, die bei Trockenstress aufgrund der geschlossenen Stomata vermehrt auftreten.

Observatorische Studien in älteren Beständen

Zur Analyse des Höhenwachstums in älteren Eichenbeständen wurden keine speziellen Untersuchungen gefunden. Eine gewisse Ausnahme stellt die Auswertung eines der ersten Stieleichen-Provenienzversuche von CIESLAR (1923) im Wiener Wald dar. Er schätzt u.a. die Trockenstressreaktion im Trockenjahr 1917 an den damals ca. 15jährigen Eichen von 21 Herkunftsorten aus ganz Europa ein und stellt beträchtliche Unterschiede in der Reaktion des Höhenzuwachses im Trockenjahr 1917 im Vergleich zu 1916 fest. In der Vegetationsperiode (April bis Sept) wurden 1917 an der 2 km von den Anbauflächen entfernten Station Hadersdorf nur 48 % des langjährigen Mittels gemessen. Vor allem die schwedischen Herkünfte zeigten im Trockenjahr keinen Höhenzuwachsenbruch. In seiner Analyse kommt CIESLAR zu dem Schluss, dass „jene Eichenpartien, deren Heimat ozeanisches Klima besitzt, durch die Dürre des Sommers 1917 in viel höherem Grade gelitten haben müssen, als die Stieleichen aus Wuchsgebieten mit trockenem, kontinentalem Klima.“ (ebenda, S. 137). Einschränkend zu dieser historischen Studie muss genannt werden, dass der Autor die Höhenzuwächse in den Trockenfolgejahre nicht dargestellt hat und dass „...die meisten Eichelproben [...] von je einem Mutterbaume geerntet; [wurden] ... (ebenda, S. 99).

2.4.4 Höhenwachstum und Witterung/Trockenstress in Bu-Ei-Mischbeständen bzw. von Buchen und Eichen im Vergleich

Observatorische Studien in älteren Beständen

Eine erste Untersuchung zum anhand von Triebbasisnarben rekonstruierten Höhenzuwachs an älteren Bäumen stellt ROLOFF (1992) vor. Er hat an über 2000 Kronen von 14 Baumarten, darunter ca. 1000 Buchen und ca. 140 Eichen, die im Rahmen von regulären Hiebsmaßnahmen im Winter 1990/91 in Niedersachsen gefällt wurden, das Höhenwachstum der zurückliegenden zehn Jahre (1981 - 1990) rekonstruiert. ROLOFF vergleicht den Höhenzuwachs der Bäume in den Jahren 1983, 1984 und 1990 mit dem der „sonstigen Jahre“ im genannten Zeitraum. Diese Jahre folgten auf Jahre mit überdurchschnittlichen Temperaturen und unterdurchschnittlichen Niederschlägen in der Vegetationszeit, d.h. für die beiden betrachteten Klimastationen (Göttingen und Rotenburg/Wümme), dass es in den Jahren 1982, 1983 und 1989 in der Vegetationszeit ca. 1.5° wärmer war und ca. 100 mm weniger Niederschlag fiel. Für die mittelalten, 40 bis 80jährigen Buchen lag der Höhenzuwachs in den „sonstigen Jahren“ bei durchschnittlich knapp 40 cm und in den Trockenfolgejahren bei knapp 10 cm. Für das Kollektiv der über 80jährigen Buchenaltbestände werden ca. 25 cm Höhenzuwachs in den „sonstigen Jahren“ und ca. 2 cm in den Trockenfolgejahren angegeben. Die Höhenwachstumsreduktion bei den Eichen fällt bei den mittelalten Beständen (30 cm vs. ca. 20 cm) weniger ausgeprägt aus und ist bei den Eichen-Altbeständen nicht mehr vorhanden (jeweils ca. 15 cm). ROLOFF gibt für seine Auswertungen keinen Stichprobenumfang, keine Fehlerbreiten und keine Signifikanzwerte an (ebenda, Tabelle 1 und Abbildung 3) und geht, obwohl ihm die Problemstellung sicherlich bewusst war, nicht auf die Johannistriebbildung und deren Auswirkung auf die Triebbasisbildung bzw. deren Berücksichtigung bei seinen Aufnahmen ein.

In der Schweiz wurden auf zwei in Bu-Ei-Mischbeständen gelegenen Dauerbeobachtungsflächen deutliche Unterschiede im Höhenzuwachs von Buchen und Eichen beobachtet (BRAUN, FLÜCKIGER 2013). Während sich die Buche auf der Fläche bei Champagne (Jurasüdfuss) nach einem deutlichen Einbruch in den Jahren 2004 bis 2007, erst ab 2008 wieder erholte, wurde bei der Eiche nur in 2004 und 2007 ein geringfügiger Zuwachsrückgang festgestellt. An diesem Standort war auch in Folge des trockenen Sommers 2011 ein starker Laubverlust an der Buche zu beobachten. Aufgrund des stark schwankenden Höhenwachstums der Buchen an diesem Standort wird der Laubverlust jedoch nur als vorübergehende Beeinträchtigung der Vitalität interpretiert (ebenda, S. 127). In Sissach in der Nordwestschweiz verharren die Buchen dagegen ab 2004 bis zum Ende der Beobachtung (2011) auf sehr niedrigem Niveau mit Triebhöhen von 2 - 3 cm, wohingegen bei den Eichen im selben Beobachtungszeitraum ein von Jahr zu Jahr stark schwankendes Höhenwachstum festzustellen war (ebenda, S. 102, Abb. 121). Leider sind in dem Monitoringbericht keine Angaben zum Alter und zur Anzahl der beobachteten Bäume enthalten.

Trotz der genannten Einschränkungen deuten die vorgestellten Untersuchungen zum Höhenwachstum der beiden Baumarten an, dass die Eiche auf Trockenstress offensichtlich weniger sensitiv reagiert als die Buche und sich dadurch im Konkurrenzkampf ggf. Vorteile sichern kann. Diese Annahmen wurden zur Formulierung der Hypothesen für die vorliegende Arbeit genutzt (vgl. Kapitel 2.8).

2.5 Dickenzuwachs bei Buche und Eiche in Abhängigkeit von Witterung und Trockenstress

2.5.1 Allgemeine Anmerkungen zum Dickenzuwachs und Witterung/Trockenstress

Schon seit langem beschäftigen sich Forstwissenschaftler und Dendrochronologen mit den Zusammenhängen zwischen Dickenzuwachs und Witterung. Für die Untersuchungen mit

forstlichem Hintergrund standen und stehen vor allem die Zuwachsreduktion der Baumarten nach Extremjahren im Vordergrund, um daraus Rückschlüsse auf die Produktivität der Baumarten bzw. deren zukünftige Anbauwürdigkeit ableiten zu können. Stärker dendrochronologisch orientierte Arbeiten an rezentem Material legen ihren Fokus vielfach allgemeiner auf die generellen Zusammenhänge zwischen Witterung und Jahrringbreite, um dann z.B. anhand von archäologischen Proben die Klimaverhältnisse der Vergangenheit rekonstruieren zu können oder aber generelle Aussagen zur Veränderung der Zusammenhänge zwischen Wachstum und Witterung ableiten zu können (Dendroklimatologie).

Das in der Dendrochronologie wichtige Prinzip des „cross-datings“, wonach anhand von charakteristischen Mustern verschiedene Jahrringserien miteinander verbunden werden können, wurde vermutlich bereits im Jahre 1737 von den Franzosen Duhamel und Buffon entdeckt, als sie feststellten, dass sie anhand eines schmalen Jahrrings an verschiedenen Bäumen einen Frostschaden des Winters 1708/1709 rekonstruieren konnten (STUDHALTER 1956). In Deutschland widmete sich Theodor Hartig, Sohn des bekannten Forstwissenschaftlers Georg Ludwig Hartig, als erster sehr eingehend dem Studium der Jahrringe und publizierte zwischen 1869 und 1901 „34 Artikel über Anatomie und Ökologie der Jahrringe“ (SCHWEINGRUBER 1983, 218). Die Dendrochronologie als Wissenschaft entwickelte sich zunächst in den USA um 1900. Als ihr Gründungsvater gilt A. E. Douglass, der sich für die Zusammenhänge zwischen Sonnenflecken und Jahrringbreiten interessierte (FRITTS 2001).

Erste Arbeiten mit forstlichem Hintergrund und mit Bezug zur Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen nach dem Trockenjahr 1947 entstanden in den 1950er Jahren. Hier sind die Arbeiten von GÜNTHER (1954), SCHÖBER (1951a) und KRÖNER (1952) zu nennen.

Es existiert eine Vielzahl von dendrochronologischen Untersuchungen zu den Beziehungen zwischen der Witterung und/oder Trockenstress und dem Radialzuwachs bei Buchen und Eichen. Da ältere Bäume nur in absoluten Ausnahmefällen unter experimentellen Bedingungen über Jahrzehnte heranwachsen, handelt es sich dabei ausschließlich um observatorische Studien. Theoretisch sind auf Dauerbeobachtungsflächen auch Ergebnisse zum jährlichen Radialzuwachs ohne die Entnahme von Bohrkernen oder Stammscheiben denkbar. Da diese Flächen jedoch in der Regel nur alle fünf Jahre aufgenommen werden, ist eine jährliche Auswertung nicht möglich, weshalb in den Fällen bei denen langfristige Versuchsflächendaten einbezogen werden, meist mit einer Methodenkombination unter Hinzuziehung der Dendrochronologie gearbeitet wird. Um den Überblick in der Fülle der Literatur nicht zu verlieren, wird im Folgenden zunächst auf Arbeiten eingegangen, die den Radialzuwachs von Buchen und Eichen unter Witterungs-/Trockenstressaspekten vergleichen. Dabei wurde im Rahmen von observatorischen Studien entweder Material in Buchen-Eichen-Mischbeständen gewonnen, oder es wurden nahe beieinander liegende Standorte mit Reinbeständen ausgewählt, in denen die beiden Baumarten vorkommen. Teilweise bilden diese Studien einen Gradienten ab, z.B. hinsichtlich Wasserverfügbarkeit, Höhenlage oder Kontinentalität, oder vergleichen zumindest zwischen zwei unterschiedlichen Standorten. Außerdem wird, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, im Weiteren auf interessante Einzelfallstudien zu einer der beiden Baumarten eingegangen, in denen neben dem Witterungs- bzw. Trockenstressaspekten andere spezielle wachstumsrelevante Parameter im Fokus standen.

2.5.2 Dickenzuwachs und Witterung/Trockenstress in Bu-Ei-Mischbeständen bzw. im Vergleich

Vergleich von zwei Standorten

SCHÖBER (1951a) vergleicht den Zuwachseinbruch aufgrund des Trockenjahres 1947 von insgesamt acht Baumarten anhand von „Bohrspanentnahmen“ in einem Meter Höhe in 20 bis 40jährigen Beständen bei Göttingen. Er untersucht jeweils fünf herrschende Bäume im ca. 300m üNN gelegenen

Revierteil „Kattenbühl“ und in einem höher gelegenen Revierteil „Steinberg“ (500 m üNN) (Jahresdurchschnittstemperatur in Göttingen: 8.5°C, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 607 mm, 1891-1930). Das Trockenjahr 1947 war durch außergewöhnlich geringe Niederschläge vor allem im August und September gekennzeichnet. In diesen beiden Monaten fielen in Göttingen nur 33 mm Niederschlag im Vergleich zu 119 mm im langjährigen Durchschnitt. Die Temperaturen in der Vegetationszeit (Mai – Sept.) lagen 1947 ca. 2°C über dem langjährigen Mittelwert. Im Trockenfolgejahr 1948 waren die Niederschläge wieder etwas höher als im langjährigen Durchschnitt, 1949 jedoch wieder deutlich geringer. In Göttingen fielen in der Vegetationszeit 1947 und 1949 nur 70 % der langjährigen mittleren Niederschläge, wobei 1949 die Dürre bereits Mitte Juni einsetzte. Insgesamt sind die Radialzuwachsunterschiede zwischen Buche und Eiche (*Quercus robur* und *Quercus petraea*) in den von SCHOBER analysierten Jahren gering. Beide Baumarten, mit Ausnahme der Buche am höher gelegenen Standort, reduzieren ihren Radialzuwachs im Trockenjahr auf 69 bis 88 % des Niveaus von 1946. SCHOBER bezeichnet die Buche als am „weitaus widerstandsfähigsten“, da sie „nur in der Tieflage eine deutliche Reaktion auf die Trockenjahre zeigte, während sie in der Hochlage in den Jahren 1947 und 1949 sogar Zuwachssteigerungen gegenüber 1946 erzielen konnte.“ (ebenda, S. 213).

KRÖNER (1952) untersucht die Folgen des Trockenjahres 1947 auf den Radialzuwachs an zwei Standorten in Bayern (Forstamt Dombühl in Mittelfranken: mittlere jährliche Niederschlagssumme: 680 mm, 1891-1930 Wetterwarte Ansbach und Wörnitz und Forstamt Bad Tölz in Oberbayern: mittlere jährliche Niederschlagssumme: 1470 mm, 1891-1948 Wetterwarte Tölz) von mehreren Baumarten, unter anderem von ca. 40jährigen Traubeneichen, Stieleichen und Buchen. Der Autor stellt den Zuwachseinbruch und die Erholung der Baumarten über den relativen Grundflächenzuwachs der Baumarten im Vergleich zueinander dar. Dabei setzt er den von jeweils zehn herrschenden Bäumen in den Jahren 1941 bis 1950 geleisteten mittleren jährlichen Grundflächenzuwachs, welcher anhand von zwei „Bohrspanentnahmen“ pro Baum ermittelt wurde, auf 100 % (ebenda, S. 49, Abb. 20 A und B). Aus dem Vergleich von Buchen und Eichen wird deutlich, dass die Buche im Trockenjahr 1947 in beiden Untersuchungsregionen stärker einbricht und sich darüber hinaus auch langsamer als die Eichen erholt. Für den Untersuchungsstandort Grimmschwinden (FA Dombühl) gibt KRÖNER bei der Traubeneiche eine Reduktion des Radialzuwachses auf 95 % und für die Buche auf 44 % (!) des Niveaus von 1946 an. In den Jahren 1948 und 1949 leistet die Traubeneiche im Schnitt sogar 156 % des Niveaus von 1946, die Buche dagegen nur 75 %. Erst 1950 erreicht auch die Buche wieder ein höheres Radialzuwachs-niveau als 1946. Diese Auswertungen veranlassen KRÖNER zu folgender Bewertung: „Vergleicht man die Zuwachsergebnisse von Buche und Traubeneiche im Gefolge von 1947, so ist bei ersterer nicht nur die Wuchsstockung stärker ausgeprägt, sondern erstreckt sich auch vorwiegend auf die beiden Jahre 1947 und 1949. ... Die Eiche hatte somit die geringsten Nachwirkungen beim Dickenzuwachs nach 1947 zu verzeichnen.“ (ebenda, S. 52).

Ohne klare Aussage hinsichtlich einer Unterschiedlichkeit in der Trockenstressreaktion von Eichen und Buchen bleibt die Untersuchung von GÜNTHER (1954). Er analysiert im baden-württembergischen Neckarland jeweils 23 Bestände und entnimmt für beide Baumarten ca. 1000 Bohrspäne. Letztlich gibt er in seiner Arbeit jedoch für beide Baumarten nur einen relativen Zuwachsrückgang, ausgedrückt als „mittlerer Durchmesserzuwachs in der Zeit von 1948-1952“ im Vergleich zum „mittleren Durchmesserzuwachs in der Zeit von 1943-1947“, von jeweils 5.5 % an (ebenda, S. 79, Tabelle 5). Die „absichtliche ... einjährige Phasenverschiebung ... zwischen ... Witterungsabschnitten und ... Jahrringabschnitten“ (ebenda, S. 76) hat aufgrund der bei SCHOBER und KRÖNER zumindest für die Buche dargestellten, unmittelbaren Wirkung des Trockenjahres 1947 auf den Radialzuwachs, sicherlich nicht zur Differenzierung zwischen den beiden Baumarten beigetragen.

Da sich die Aussagen von SCHÖBER und KRÖNER zur Trockenstress-Sensitivität von Buchen und Eichen widersprechen und aus der Untersuchung von GÜNTHER keine Tendenz abzulesen ist, bleiben Unterschiede zwischen den beiden Baumarten nach dem Trockenjahr 1947 ungewiss.

FRIEDRICHS ET AL. (2009) untersuchen in 19 Rein- und Mischbeständen in den beiden Nationalparks Eifel (mittlere jährliche Niederschlagssumme: 996 mm, 1961-1990) und Kellerwald (mittlere jährliche Niederschlagssumme: 719 mm, 1961-1990) den Radialzuwachs von (vor-)herrschaftlichen Buchen, Traubeneichen und Kiefern anhand von Bohrkernen. Die mittlere Serienlänge (MSL) über alle Standorte und Baumarten beträgt hierbei 155 Jahre. Aufgrund der seit den 1950er Jahren zunehmenden Anzahl an signifikanten Korrelationskoeffizienten mit den monatlichen PDSI-Werten kommen die Autoren u.a. zu dem Schluss, dass die Buche im Vergleich der drei Baumarten die am stärksten gefährdetste Baumart bei zukünftig zunehmender Trockenheit sei. Wörtlich heißt es: „*F. sylvatica*, which shows the strongest temporal increase in drought sensitivity in our study, is most likely to be endangered under future drought increases.“ (ebenda, S. 738).

Untersuchung entlang eines Gradienten

BONN (2000) untersucht in insgesamt 18 Beständen auf unterschiedlichen Standorten von Mittel- bis Nordostdeutschland die Konkurrenzdynamik zwischen Buchen und Eichen anhand von entnommenen Bohrkernen. Von den 18 Beständen sind zehn Bu-TEi- oder Bu-SEi-Mischbestände und acht Buchenreinbestände. In den Beständen wurden jeweils Gruppen mit mindestens 15 Bäumen aller Kraft'schen (KRAFT 1884) Klassen beprobt. Das mittlere Alter aller Untersuchungsbäume pro Bestand lag zwischen 108 und 202 Jahren, wobei die Buchen in den Mischbeständen i.d.R. jünger als die Eichen waren. In den Mischbeständen war i.d.R. eine einzel- bis gruppenweise Mischung der beiden Baumarten gegeben. BONN stellt aufgrund von diversen dendroklimatologischen Analysen, u.a. Weiserjahrenanalysen und *response functions*, einen ausgeprägteren Zusammenhang zwischen Witterung und Zuwachs bei der Buche als bei der Eiche fest. Außerdem unterteilt er die untersuchten Standorte in drei Kategorien bezüglich ihrer Wasserversorgung und stellt fest, dass die Radialzuwachsüberlegenheit der Buchen auf den gut wasserversorgten Standorten am größten ist, aber auch noch auf den schlecht wasserversorgten Standorten gegeben ist. Da diese Standorte einen Ellenberg-Quotient (vgl. Kapitel 1.2) von über 30 aufweisen, folgert BONN: „Die Dominanz der Buche scheint also noch weiter zu gehen als gemeinhin oder bisher angenommen wird.“ (ebenda, S. 91). Anhand des Vergleichs der Radialzuwachskurven auf Standortebene zeigt BONN außerdem, dass der Radialzuwachs der Eichen in der Jugendphase i.d.R. über dem der Buchen liegt, dann eine Phase mit gleich hohem Zuwachs folgt und diese allmählich in eine Zuwachsüberlegenheit der Buchen übergeht. BONN führt diese Phasen auf das unterschiedliche Wuchsverhalten von Licht- und Schattbaumarten zurück und sieht dies als Beweis für die Konkurrenzüberlegenheit der Buche.

ZANG ET AL. (2011) untersuchen mit klassischen dendrochronologischen Methoden den Radialzuwachs von Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie, Buche und Stieleiche an insgesamt 47 Standorten, wovon sich 39 in Bayern befinden. Es werden pro Standort aus Rein- oder Mischbeständen von 12 bis 15 (vor-)herrschaftlichen Bäumen jeweils zwei Bohrkern entnommen und letztlich von zehn Bäumen eine Jahrringchronologie gebildet. Insgesamt entstehen so 143 Chronologien, wobei zum Alter der Bestände oder der MSL der Bohrkern keine Aussage in der Dissertation von ZANG (2011) oder in den entsprechenden Publikationen (ZANG ET AL. 2011; ZANG ET AL. 2014) zu finden ist. Für die Trockenjahre 1947, 1976 und 2003 berechnen die Autoren einen *kurzfristigen Zuwachseinbruch*, ermittelt aus dem Zuwachs im Trockenjahr im Verhältnis zum Mittelwert des Radialzuwachses in den fünf Jahren vor dem Trockenjahr. Außerdem wird ein *langfristiger Zuwachseinbruch* berechnet, ermittelt aus dem mittleren Zuwachs im Trockenjahr bis zwei Jahre danach, im Verhältnis zum Mittelwert des Radialzuwachses in den fünf Jahren vor dem Trockenjahr. Der kurzfristige Zuwachseinbruch der Buche ist deutlich ausgeprägter als derjenige der Eiche. Dieses Ergebnis ist aufgrund der Holzanatomie und Physiologie der beiden Baumarten,

die Buche ist eine zerstreut-mikropoorige Baumart die Eiche dagegen eine ringpoorige Baumart (BRAUN, 1982), zu erwarten. Bezüglich des langfristigen Zuwachseinbruchs finden ZANG ET AL. kaum Unterschiede zwischen den beiden Baumarten: „Die Buche erholt sich ähnlich schnell wie die Eiche, scheint aber auf den tief gelegenen Keuperstandorten in 200 m Höhe langsam an ihre Grenzen zu stoßen...“ (ebenda, S. 102). Mit den trendbereinigten Radialzuwachsreihen als Antwortvariable und den distanzgewichteten Witterungsdaten von der nächstgelegenen Wetterstationen als Prädiktorvariable berechnen ZANG ET AL. (2011) *response functions* für alle Baumarten. Im Vergleich der Regressionskoeffizienten zwischen Buchen und Eichen fällt hier über alle Standorte lediglich auf, dass die Buche deutlich negativer auf hohe Temperaturen im Juni reagiert als die Stieleiche. Zur erleichterten Interpretation der Ergebnismatrix aus den *response functions*, die aus 32 Prädiktorvariablen mal 143 Chronologien besteht, nehmen die Autoren eine Hauptkomponentenanalyse selbiger vor. Dabei trennt die 1. Hauptkomponente entlang der Niederschläge im Sommer mit hoher negativer Faktorladung und der Temperaturen im Sommer mit hoher positiver Faktorladung (ebenda, S. 103, Abb. 5). Während die Buche in der Kartendarstellung viele Standorte mit negativer Faktorladung auf der 1. Hauptkomponente aufweist und demzufolge eine starke Assoziierung mit Sommertrockenheit hat, haben die Eichenstandorte eine positive Faktorladung und eine starke Assoziierung mit Sommerwärme (ebenda, S. 104, Abb. 6). Schließlich berechnen ZANG ET AL. (2011) noch einen Transpirationsquotienten aus dem Verhältnis zwischen potenzieller und aktueller Transpiration und nutzen diesen zur Vorhersage der indexierten Radialzuwächse. Wiederum zeigt die räumliche Verteilung signifikante Zusammenhänge an vielen Buchenstandorten aber nur an wenigen Eichenstandorten. Die Autoren fassen die Zuwachsreaktionen der Buche in der Diskussion folgendermaßen zusammen: „Im Untersuchungsgebiet zeigt die Buche eine deutlichere Limitierung des Zuwachses durch sommerliche Trockenheit als die Eiche, Die Erholung nach Extremjahren verläuft jedoch gut ...“ (ebenda, S. 106). Zur Eiche erwähnen die Autoren: „Damit kann insgesamt von einer verhältnismäßig geringen Limitierung des Wachstums der Eiche von trockenen und warmen Sommern ausgegangen werden, und die schnelle Erholung nach Extremjahren legt eine besondere Anbaueignung ... unter künftigen Klimabedingungen nahe.“ (ebenda, S. 107).

SCHWARNWEBER ET AL. (2011) führen eine vergleichende dendrochronologische Analyse von Jahrringzuwächsen in drei Stieleichen-Buchen-Mischbeständen entlang eines West-Ost-Gradienten im südlichen Mecklenburg-Vorpommern durch. Die mittlere jährliche Niederschlagssumme liegt an den Untersuchungsstandorten von West nach Ost bei 663, 595 und 540 mm, die Jahresdurchschnittstemperatur bei 8.3°C, 7.9°C und 8.3°C (Bezugszeitraum: 1961-1990). Die MSL beträgt zwischen 110 und 140 Jahren, lediglich am westlichen Standort ist die Stieleiche deutlich älter mit einer MSL von 214 Jahren. Insgesamt werden von den Autoren 133 Bäume beprobt. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie sind:

- Die mittlere Jahrringbreite der Buche nimmt von Westen nach Osten ab, die Eiche zeigt keinen entsprechenden Trend, hat aber insgesamt deutlich geringere Jahrringbreiten.
- Die mittlere Interserienkorrelation nimmt für beide Baumarten von Westen nach Osten zu, d.h. der trendbereinigte Radialzuwachs beider Baumarten ist im Osten offensichtlich stärker von der Witterung beeinflusst.
- Die *correlation* und *response functions* zeigen nur marginale Unterschiede zwischen den beiden Baumarten, am stärksten positiv wird der Radialzuwachs beider Baumarten von den Niederschlägen im Mai bis Juli des laufenden Jahres beeinflusst.
- Im analysierten Zeitraum von 1900 bis 2010 nehmen die negative Weiserjahre (*pointer years*) für Buche seit den 1970er Jahren deutlich zu. Bei Eiche ist dieser zeitliche Trend nicht zu beobachten. Ebenso nehmen die negativen Weiserjahre von West nach Ost bei beiden Baumarten zu.

- Die Jahrringbreiten über dem Alter zeigen eine abnehmende Wuchsüberlegenheit der Buche entlang des West-Ost-Gradienten. Auf der östlichen Fläche liegen die Jahrringbreiten der Eiche in den letzten 10 Jahren über denjenigen der Buchen.

Diese Ergebnisse veranlassen SCHARNWEBER ET AL. zu der, möglicherweise gewagten, abschließenden Aussage: „From their strong dependency of growth to water availability, ... , we conclude that a warmer and drier growing season might lead to decreasing future growth trends for both beech and oak. As this dependency is more pronounced for *Fagus*, this species is likely to suffer more from increasing drought stress ...” (ebenda, S. 958).

BECK (2011) analysiert die Radialzuwächse von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche auf den Level II-Flächen in Deutschland. Pro Fläche entnimmt er an mindestens 20 (vor-) herrschenden Bäumen zwei Bohrkerne und kann damit für die Buche 25 und für die beiden Eichenarten elf Jahrringchronologien aufstellen, diese basieren auf insgesamt 554 angebohrten Buchen und 209 Eichen. Anhand von verschiedenen Störungsindikatoren wie z.B. Trendbrüchen oder Abweichungen in den Jahrring- oder Grundflächenchronologie stellt BECK bei der Buche häufigere Störungen als bei Eiche fest. Die auf die Radialzuwachswerte der Jahre 1998 bis 2002 referenzierten Indexwerte der Chronologien zeigen für die Buche einen deutlichen Zuwachseinbruch vor allem im Trockenfolgejahr 2004, dagegen reagieren die Eichen im Radialzuwachs kaum auf das Trockenjahr 2003 (ebenda, S. 24, Figure 4c und b). In den Schlussfolgerungen fasst BECK aufgrund seiner Ergebnisse zusammen: „The shade tolerant tree species spruce and beech with higher requirements to soil and air humidity suffer more from drought events than pines and oaks” (ebenda, S. 26). Leider enthält der genannte Tagungsbeitrag von Beck keine Altersangaben zu den Untersuchungsbäumen. In einem gemeinsamen Artikel mit SEIDLING ET AL. (2012) wird eine Untergruppe von neun Buchenflächen analysiert und deren Alter mit 70 bis 110 Jahren angegeben.

Zur Klärung der Frage, ob temporäres Auftreten von Stauwasser im Boden oder sommerliche Trockenheit den Radialzuwachs von Buchen und Stieleichen unterschiedlich beeinflusst, führen SCHARNWEBER ET AL. (2013) eine weitere dendrochronologische Untersuchung in 2 Bu-Ei-Mischbeständen und je einem Bu- und Ei-Reinbestand auf hydromorphen Böden (Stagnosolen) im nördlichen Mecklenburg-Vorpommern durch. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass der Stauwassereinfluss im Frühjahr einen geringeren Effekt auf den Radialzuwachs der Buche hat als Trockenheit im Sommer. Eichen und Buchen hätten auf den untersuchten Standorten zwar vergleichbare Radialzuwachsrate, von der verlängerten Vegetationsperiode würde jedoch v.a. die Eiche profitieren, auch sei diese aufgrund ihrer physiologischen und morphologischen Merkmale auf diesen Standorten besser geeignet.

Untersuchung an einem Standort

MICHELOT ET AL. (2012) untersuchen den Radialzuwachs von Buche, Traubeneiche und Kiefer in jeweils drei Reinbeständen im Wald von Fontainebleau (bei Paris, mittlere jährliche Niederschlagssumme: 750 mm, Jahresdurchschnittstemperatur: 10.6°C). Das mittlere Alter der untersuchten Buchen pro Bestand lag zwischen 92 und 114 Jahren, das der Eichen zwischen 151 und 199 Jahren. Die Buchen und Eichen weisen im Mittel der drei Standorte fünf gemeinsame negative Weiserjahre, hier definiert als Jahre, in denen der Radialzuwachs bei 75 % der Bäume höchstens 90 % des Vorjahres beträgt, auf. Diese sind: 1974, 1976, 1989, 1990 und 2004. Die *correlation functions* zeigen u.a. signifikante Abhängigkeiten in den jeweils drei Beständen zwischen indexierten Radialzuwachsen und monatlichen Niederschlägen im Mai bis Juli des laufenden Jahres für Buchen und Eichen, wobei die Korrelationskoeffizienten für die Buche im Schnitt höher sind. *Response functions* mit monatlichen Temperatur- und Wasserhaushaltsdaten als Prädiktoren weisen in der Summe eine höhere Anzahl signifikanter Monate bezüglich der Intensität des Wasserdefizits bei Eiche (7) als bei Buche (4) auf, wobei unterschiedliche Monate in den jeweils drei Beständen von Juni bis August des laufenden Jahres signifikant sind. Trotz dieser

nicht ganz eindeutigen Ergebnisse interpretieren die Autoren sie dahingehend, dass die Buche die Baumart sei, die am sensibelsten auf die Witterungsbedingungen im laufenden Jahr reagiert habe.

CAVIN ET AL. (2013) untersuchen im Lady Park Wood National Natures Reserve in Wales (mittlere jährliche Niederschlagssumme: 803 mm, Jahresdurchschnittstemperatur: 9.3°C, 1961-1990) 93 Buchen und Eichen anhand von Bohrkernentnahmen. Die Buchen werden aufgrund des Kronenzustandes in ein Kollektiv stark geschädigter und wenig geschädigter Bäume unterteilt, sie haben eine MSL von ca. 110 Jahren, während die Eichen deutlich älter sind und eine MSL von 175 Jahren aufweisen. Neben dem Radialzuwachs werten die Autoren ein über 65 Jahre in unregelmäßigen Abständen aufgenommenes Transekt zu Wachstum und Mortalität in dem Bestand aus. Im Ergebnisteil erläutern die Autoren, dass die *response und correlation functions* generell stärkere Zusammenhänge für die Buchen als für die Eichen haben. Die Auswertung der Mortalitätsstatistik zeige, dass die Buchen vor allem nach dem Trockenjahr 1976 vermehrt abgestorben sind, während die Eichen erst ab Mitte der 1990er Jahre verstärkte Mortalitätserscheinungen aufweisen. Des Weiteren zeigen die Buchen nach dem Trockenjahr 1976 eine höhere Sensitivität als davor. Die Sensitivität wird hierbei über die Veränderung des Gini-Koeffizienten anhand der mit einem autoregressiven Modell erstellten Grundflächenzuwachsreihen von 1929 bis 1975 im Vergleich zu 1976 bis 2009 untersucht. Die Eichen würden diese unterschiedliche Sensitivität nicht aufweisen. Schließlich vergleichen die Autoren die Erholungsreaktion der beiden Baumarten nach 1976 anhand des Grundflächenzuwachses mit nicht-linearen Modellen. Sie zeigen, dass die mit den Modellen ausgeglichenen Grundflächenzuwächse der Buchen das Niveau von vor der Trockenheit nicht wieder erreichen; auch dieses im Gegensatz zu den Eichen, die bereits ab 1977 wieder ein höheres Niveau als vor der Trockenheit erreichen und erst ab 1994 wieder auf das Niveau von vor der Trockenheit von 1976 abfallen. In der Diskussion legen CAVIN ET AL. Wert auf die Feststellung, dass das extreme Trockenjahr 1976 die Konkurrenzverhältnisse in dem Bestand temporär zugunsten der Eiche verändert habe. Die Erholung sei als nicht-linearer Prozess verlaufen, wobei v.a. die Schwellenwerte, die zu solchen Veränderungen der Konkurrenzverhältnisse führen, noch unbekannt seien.

Eine bereits nicht mehr ausschließlich dendrochronologisch ausgerichtete Untersuchung, stellt die Studie von LEUSCHNER ET AL. (2001) in einem Buchen-Traubeneichen-Mischbestand in der Lüneburger Heide (mittlere jährliche Niederschlagssumme: 800 mm, Jahresdurchschnittstemperatur: 8°C) in den Jahren 1990 bis 1995 dar. Sie untersuchen mehrere wachstumsbezogene, physiologische Parameter und den Grundflächenzuwachs anhand von Banddendrometern. Die Banddendrometer wurden an jeweils 20 Bäumen in fünf für den Bestand repräsentativen Durchmesserklassen angebracht. Die im Bestand dominierenden Buchen (90 %) sind laut den Autoren zwischen 90 und 110 Jahren alt, die Eichen zwischen 180 und 200 Jahren alt. Die Buche reagiert in den beiden moderaten (1991, 1992) und dem stark trockenen Sommer (1995) mit einer, im Vergleich zu dem feuchten Sommern (1993), deutlichen Reduktion des Grundflächenzuwachses. Die Eiche reagiert weniger empfindlich und hat deshalb 1992 und 1995 einen höheren Grundflächenzuwachs als die Buche (ebenda, S. 41: Fig. 4). Die höhere Trockenstress-Sensitivität der Buche zeigt sich laut LEUSCHNER ET AL. 1995 auch in der gegenüber der Eiche erhöhten Mortalität und Wachstumsrate der Feinwurzelbiomasse, der stärkeren Reduktion der maximalen Photosyntheserate und einer höheren inter-annuellen Variabilität des Dunkelwasserpotenzials. Im Trockenjahr hat bei der Buche also eine Verschiebung der Biomasseallokation vom Stamm zu den Wurzeln stattgefunden. Für die Eiche wurde weder eine erhöhte Biomassenproduktion bei den Feinwurzeln noch ein deutlicher Rückgang des Grundflächenzuwachses im Trockenjahr 1995 gefunden. LEUSCHNER ET AL. weisen in der Diskussion der Ergebnisse jedoch darauf hin, dass auf dem untersuchten Standort die Buche der Eiche eindeutig in der Konkurrenz überlegen sei. Sie führen dies auf die Fähigkeit der Buche zurück sich schnell vom Trockenstress zu erholen: „The competitive strength of trees may depend on both, the

ability to maintain growth and vitality under stress, and the capacity to rapidly capture limiting resources under non-stress conditions.” (ebenda, S. 44).

Insgesamt zeigen die Auswertungen zum Dickenwachstum, dass im Vergleich der beiden Baumarten von den meisten Autoren die Buche als sensitive Baumart im Hinblick auf Trockenstress und Niederschlag angesehen wird, während vor allem die Traubeneiche als robuster eingeschätzt wird. Diese Annahmen sind in die Formulierung der Hypothesen in Kapitel 2.8 eingeflossen.

Untersuchungen zum Vergleich von Trauben- und Stieleiche

LÉVY ET AL. (1992) haben den Radialzuwachs von Stiel- und Traubeneiche in Zentral- und Nordwestfrankreich in 173 Beständen an jeweils fünf Bäumen pro Bestand untersucht. 112 der untersuchten Bestände wurden als Hochwald und 61 Bestände als Mittelwald bewirtschaftet. In ca. 70 % der Fälle (Hochwald), bzw. 80 % der Fälle (Mittelwald) kamen Stiel- und Traubeneiche in Mischung vor. Sie kommen zu dem Schluss, dass in Beständen, in denen beide Eichenarten gemischt auftreten, die Stieleiche aufgrund ihrer höheren Ansprüche an Nährstoff- und Wasserhaushalt einen sehr viel geringeren Radialzuwachs aufweise als die Traubeneiche. Letztere habe einen um 46 % höheren Radialzuwachs in den Mischbeständen. Auf schlecht nährstoff- und wasserversorgten Standorten und nach Trockenjahren nehme die Differenz zwischen beiden Eichenarten tendenziell zu.

BECKER ET AL. (1994) untersuchen im Wald von Champenoux und Amance (Lothringen, Frankreich) an 150 Standorten Trauben- und Stieleichen mit jeweils fünf Untersuchungsbäumen pro Standort. Sie ermitteln anhand der dendrochronologischen Analyse von Weiserjahren, dass (1) die Stieleiche doppelt so viele negative Weiserjahre aufweist als positive, während die Anzahl von positiven und negativen Weiserjahren bei der Traubeneiche gleich sei und (2) die Traubeneiche sich schneller von Stressereignissen, also von warmen und trockene Wachstumsperioden, erhole.

PONTON ET AL. (2001) vergleichen die Unterschiede von Trauben- und Stieleiche in der Wassernutzungsfähigkeit anhand von Kohlenstoffisotopen-Fraktionierungen. Im Ergebnis stellt diese Untersuchung fest, dass zwischen den beiden Arten hinsichtlich der Isotope und hinsichtlich der Gefäßdurchmesser Unterschiede bestehen. Für Traubeneiche wird eine gegenüber der Stieleiche um 13 % höhere Wassernutzungsfähigkeit berechnet. In TEi-SEi-Mischbeständen habe die Traubeneiche in der Regel ein höheres Dickenwachstum, wobei ihre höhere Konkurrenzkraft vor allem von deren Fähigkeit abhängt, Dürreperioden besser zu überstehen.

Damit bestätigen die beispielhaft vorgestellten dendrochronologischen Untersuchungen die Einschätzung, wonach die Traubeneiche die trockenstress-tolerantere der beiden Eichenarten ist (vgl. hierzu Kapitel 2.1.3 und Tabelle 1) und rechtfertigen die Auswahl der Traubeneiche als Vergleichsbaumart zur Buche in dieser Untersuchung.

Mischung und Trockenstress

Den Fokus auf die Auswirkungen von Mischungseffekten in Bu-Ei-Mischbeständen bei der Trockenstress-Reaktion legen zwei neuere Untersuchungen, einmal von PRETZSCH ET AL. (2013), sowie von MÖLDER UND LEUSCHNER (2014).

PRETZSCH ET AL. (2013) untersuchen die Trockenstressreaktion von Fichten, Buchen und Eichen, ohne dass bei Letzteren die Art unterschieden wird, nach den Jahren 1976 und 2003 anhand von Radialzuwachsanalysen. Dabei wählen die Autoren vier Fichten-Buchen und vier Buchen-Eichen-Mischbestände aus den waldwachstumkundlichen Dauerbeobachtungsflächen in Bayern (Rothenbuch, Rimpf, Kehlheim und Illertissen) aus und vergleichen deren Radialzuwachs mit dem von Reinbeständen der jeweiligen Baumarten in unmittelbarer Nachbarschaft anhand von Bohrkernentnahmen. Für den Buchen-Eichen-Vergleich werden insgesamt 129 Eichen mit einem mittleren Alter von 129 Jahren und 129 Buchen mit einem mittleren Alter von 111 Jahren beprobt. In den Ergebnissen zeigen PRETZSCH ET AL., dass die Buchen aus den Reinbeständen im Trockenjahr

1976 deutlich stärker im Grundflächenzuwachs einbrechen als die Eichen. Die Buchen erholen sich jedoch nach 1976 auch sehr viel schneller bzw. erreichen innerhalb von fünf Jahren ein höheres Niveau als die Eichen. Im Bu-Ei-Mischbestand profitiert die Buche von der Eichen-Beimischung dergestalt, dass sie im Trockenjahr 1976 einen geringeren Einbruch des Grundflächenzuwachses erfährt und sich auf ein höheres Niveau erholt als im Bu-Reinbestand. Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung werden den Ergebnissen von PRETZSCH ET AL. in Kapitel 5.3.2.4 detailliert gegenübergestellt.

MÖLDER UND LEUSCHNER (2014) finden in ihrer dendrochronologischen Untersuchung an 152 Buchen im Nationalpark Hainich (mittlere jährliche Niederschlagssumme: 590 mm, Jahresdurchschnittstemperatur: 7.5°C, 1973 - 2004), dass die Baumartenzusammensetzung in der unmittelbaren Nachbarschaft der Untersuchungsbäume einen signifikanten Einfluss auf die Höhe des mittleren Radialzuwachses und die Sensitivität der Zuwachsreaktion nach dem Trockenjahr 1976 hatte. Höhere mittlere Radialzuwächse und eine reduzierte Sensitivität wurden gefunden, wenn Linde-, Esche und Ahorn in der Nachbarschaft der Buchen standen, nicht jedoch bei benachbarter Eiche.

Die Ergebnisse von MÖLDER UND LEUSCHNER (2014) sind damit nicht konsistent zu den Ergebnissen von PRETZSCH ET AL. (2013). Zu Beginn der Arbeiten der hier vorgestellten Untersuchung waren weder die Arbeiten von PRETZSCH ET AL. noch von MÖLDER UND LEUSCHNER bekannt. Deshalb wurde die konkrete Mischungssituation am Untersuchungsbaum nur nachrangig bei der Auswahl derselben berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.1.3). Die Mischungssituation in der hier vorgestellten Untersuchung und die möglichen Auswirkungen auf die Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen werden in Kapitel 5.3.2.4 kritisch diskutiert.

2.5.3 Trockenstress-Reaktionen in verschiedenen Stammhöhen

Untersuchungen, die den Radialzuwachs in verschiedenen Stammhöhen gegenüberstellen, sind recht selten und fokussieren kaum auf die Trockenstressreaktion, sondern allenfalls auf die Effekte von Durchforstungen oder Düngung auf die Stammform bzw. Vollholzigkeit von Bäumen und Beständen. Frühe Untersuchungen, die sich dieser Frage gewidmet haben, sind die bereits erwähnten von KRÖNER (1952) und SCHÖBER (1951a). KRÖNER gibt den Radialzuwachs*einbruch* in den Jahren 1947 (Trockenjahr) bis 1950 im Vergleich zu 1946 in verschiedenen Stammhöhen an. Dabei werden lediglich Mittelwerte von pro Höhe zwei entnommenen Bohrkernen und von fünf Bäumen berechnet. Die auf lehmigen Sand über Lettenkeuper stockenden 38jährigen Buchen mit einer mittleren Höhe 8.5 m zeigten auf 1.3 m Höhe den stärksten Zuwachseinbruch und mit zunehmender Stammhöhe eine abnehmende Tendenz. Die *Erholungsreaktion*, ausgedrückt über den relativen Radialzuwachs, d.h. den mittleren Radialzuwachs der Jahre 1948 bis 1950 bezogen auf den Radialzuwachs von 1946, war dagegen auf 3.0 m Höhe am ausgeprägtesten. Dort betrug der relative Radialzuwachs 104 %, gefolgt von der 1.3 m Höhe mit 97 %, dann 5.0 m Höhe mit 74 % und 7.0 m mit 64 % relativem Radialzuwachs. Im oberen Kronenbereich war die Erholungsreaktion also deutlich schwächer ausgeprägt als am Stammfuß. Bei den untersuchten 40jährigen Traubeneichen (Höhe 10 m) auf demselben Standort war dagegen der Zuwachseinbruch 1947 auf 9.0 m Höhe am Größten, und nahm nach unten hin ab. Die Erholungsreaktion der Eichen war auf 1.3 m mit 161 % relativem Radialzuwachs am deutlichsten ausgeprägt und nahm nach oben hin ab. So wurden bei 9.0 m nur noch 83 % des relativen Radialzuwachses erreicht. SCHÖBER analysiert an den beiden bereits in Kapitel 2.5.2 vorgestellten Untersuchungsstandorten lediglich eine Buche und eine Eiche, d.h. insgesamt vier Bäume im Alter von ca. 40 Jahren und einer Höhe von ca. 16 m. Er gibt als Entnahmestelle jeweils die relative Höhen, d.h. die Höhe in „% der gesamten Baumhöhe vom Boden aus“ (ebenda, S. 217: Tabelle 7) in Abständen von 10 und 20 Prozent an. Als Bereich mit den stärksten Zuwachseinbrüchen im Trockenjahr 1947, dargestellt ebenfalls als relativer Radialzuwachs, hier aber im Vergleich zum „Normaljahr“ 1946, sind dies bei den beiden Buchen die relativen Höhen zwischen 21 und 40 % (ca. 5 m Höhe). Die beiden Eichen zeigen dagegen sehr

unterschiedliche Höhen für den maximalen Zuwachseinbruch: einmal den Bereich zwischen 41 und 60 % (ca. 8 m) und einmal den Bereich zwischen 11 und 20 % (ca. 2 m). Die Erholungsreaktion in den Jahren 1948 und 1949, dargestellt als relative Jahrringbreite bezogen auf die Jahrringbreite von 1946, verläuft an allen vier Bäumen nach demselben Muster, wie der Zuwachseinbruch, d.h. die geringste Erholung erfolgt in den Höhen mit dem stärksten Zuwachseinbruch. Eine Erholung auf das Niveau von vor der Trockenheit wird bei beiden Buchen am Stammfuß (ca. 0.5 m) und in einem Fall auch in der Krone erreicht, die beiden Eichen zeigen ihre deutlichste Erholung in der Krone.

Eine weitere Untersuchung, die sich den Unterschieden entlang der Stammachse widmet, stellt die von BOURIAUD ET AL. (2005) dar. Die Autoren vergleichen den Grundflächenzuwachs von 30 Buchen in einem ca. 55jährigen Bestand in Lothringen in vier verschiedenen Stammhöhen. Diese sind: 1.3 m, 2.6 m, am Kronenansatz (d.h. im Mittel bei 10.8 m) und auf der Höhe zwischen Kronenansatz und 2.6 m (d.h. im Mittel bei 6.7 m). Sie kommen anhand der standardisierten Grundflächenzuwachdaten zu dem Ergebnis, dass der Zuwachseinbruch in Trockenjahren an der Stammbasis (1.3 m) am Größten ist. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen VAN DER MAATEN-THEUNISSEN ET AL. (2012) für Fichten und Tannen in den unteren Lagen des Südschwarzwaldes.

2.6 Wachstum und Trockenstress - physiologische Studien

2.6.1 Physiologische Studien zu Trockenstress und Wachstum bei der Buche

TOGNETTI ET AL. (1995) untersuchen an zwei italienischen Buchen-Herkünften (Abetone bei Florenz und Sizilien) in einem experimentellen Trockenstressexperiment die Reaktionen an einjährigen Sämlingen. Bei der sizilianischen Herkunft stellen sie im Vergleich zur Herkunft aus Mittelitalien verzögerte Trockenstresseffekte fest. Das absolute Gewicht von Stamm, Spross und Wurzel der Pflanzen aus Abetone waren zwar höher, die Pflanzen aus Sizilien hatten allerdings einen nicht signifikanten höheren Wurzelanteil. Bei allen gemessenen physiologischen Größen, also der Blattleitfähigkeit, dem Verlust an hydraulischer Leitfähigkeit, dem Pflanzenwasserstatus und dem Chlorophyll-Anteil im Blatt, zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Provenienzen.

ROSE ET AL. (2009) untersuchen die Trockenstressreaktion von 2 Buchen-Provenienzen (Solling und Südostpolen) an 1jährigen Sämlingen unter kontrollierten Bedingungen in einem zweistufigen Trockenstressexperiment. Sie analysieren insgesamt 20 physiologische, morphologische und wachstumsbezogene Parameter. Die geringere spezifische Wurzelfläche (cm^2/g Trockengewicht) und die geringeren $\delta^{13}\text{C}$ -Gehalte der Blätter der südpolnischen Provenienz im Vergleich zur deutschen Provenienz zeigen, so die Autoren, die bessere Anpassung an Trockenstress bei den Erstgenannten.

Die beiden Untersuchungen verdeutlichen beispielhaft, dass die Buche aufgrund ihrer großen ökologischen Amplitude ein sehr hohes Anpassungspotenzial besitzt und unterschiedliche Herkünfte sehr unterschiedliche Trockenstress-Reaktionen zeigen können.

2.6.2 Physiologische Studien zu Trockenstress und Wachstum bei der Eiche

In ihrer vergleichenden Studie zur trockenstress-bedingten Kavitation und blattspezifischen Konduktivität bei verschiedenen Eichenarten kommen COCHARD ET AL. (1992) zu dem Schluss, dass deren hydraulische Mechanismen unterschiedlich an Kavitations-Ereignisse angepasst sind. Sie gehen davon aus, dass die Flaumeiche die größte Resistenz zeigt, gefolgt von der Traubeneiche, der Stieleiche und schließlich der Roteiche (ebenda, S. 225). Später stellen TYREE UND COCHARD (1996) das Konzept der Vulnerabilitätskurven für sechs europäische Eichenarten vor. In diesen Kurven wird dargestellt, wie hoch der prozentuale Verlust an hydraulischer vaskulären Leitfähigkeit im Stamm bei unterschiedlichen Drücken im Xylem ist. Der Druck, bei dem 50 % der vaskulären

Leitfähigkeit verloren geht, wird als PLC50 (Percent loss conductivity) bezeichnet. Für die beiden Eichenarten geben TYREE UND COCHARD einen PLC50 von -2.7 MPa für die Stieleiche und von -3.3 MPa für die Traubeneiche an (ebenda, S. 176, Table I). Die Traubeneiche würde demnach höheren Trockenstress ertragen. Allerdings stellen TYREE UND COCHARD auch dar, dass die Trockenstress-Toleranz einer Art nicht nur von der vaskulären Leitfähigkeit im Xylem, sondern auch von der Leitfähigkeit in den Blättern und v.a. in den Wurzeln abhängig ist. GIEGER UND THOMAS (2002) legen eine weitere Studie zum Vergleich der Verlustraten im Xylem von Trauben- und Stieleiche bei experimentellem Trockenstress vor. Sie finden für die Traubeneiche ähnliche Ergebnisse wie COCHARD ET AL., d.h. Verlustraten von 46.3 % (Standardabweichung: ± 24.8 %) bei einem minimalen Blattwasserpotenzial von -3.5 MPa. Für die Stieleiche finden sie - im Gegensatz zu COCHARD ET AL. - jedoch geringere Verlustraten von 33.0 % (± 5.4 %) (GIEGER, THOMAS 2002, 179, Table 1). Die nicht konsistenten Ergebnisse hängen sicherlich damit zusammen, dass die hydraulische Architektur von Bäumen und damit auch die Zusammenhänge zwischen der Kavitations-Resistenz des Xylems und der Trockenstress-Toleranz noch nicht vollständig verstanden sind (VILAGROSA ET AL. 2012, 97), bzw. unterschiedliche und sich neu entwickelnde Messtechniken und Standards existieren (ROSNER 2014). In der jüngsten Untersuchung der französischen Forschergruppe um COCHARD werden fast identische PLC50-Werte von -3.48 und -3.46 MPa für Buche und Traubeneiche und deutlich niedrigere Werte für die Stieleiche (-2.83 MPa) bestätigt (URLI ET AL. 2013). Außerdem wird in dieser Untersuchung für die Traubeneiche gezeigt, dass ähnliche Vulnerabilitätskurven resultieren, unabhängig davon ob mit Material von älteren Bäumen (Zweigen) oder von Jungpflanzen (Stämmchen oder Wurzeln) gearbeitet wird (ebenda, Figure 1, S. 675). Aufgrund der Experimente mit 2 bis 3 jährigen Jungpflanzen die extremer Trockenheit ausgesetzt und kurz vor dem Absterben wieder bewässert werden, gehen URLI ET AL. (2013) davon aus, dass bei Angiospermen erst ein PLC-Wert bei dem 88% der hydraulischen Leitfähigkeit verloren geht, zu irreversiblen Trockenschäden führt.

Im bereits unter Kapitel 2.4.3 erwähnten Gewächshausexperiment in der Schweiz (AREND ET AL. 2011) wurde auch die Photosyntheserate untersucht. BONFILS ET AL. (2013, 28) stellen dar, dass die der Trockenheit ausgesetzte Stieleiche, als einzige der drei untersuchten heimischen Eichenarten, nach der Wiederaufnahme der Bewässerung nicht mehr das Niveau der Kontrollgruppe erreichte. Außerdem enthielten die Blätter der Stieleiche während des Trockenexperiments weniger Chlorophyll als diejenigen der beiden anderen Arten.

Bis auf die Untersuchung von GIEGER UND THOMAS (2002) bestätigen damit auch alle vorgestellten physiologischen Untersuchungen die generellen Einschätzungen, wonach die Traubeneiche die trockenstress-tolerantere der beiden Eichenarten ist (vgl. hierzu Kapitel 2.1.3 Tabelle 1) und rechtfertigen einmal mehr die Auswahl der Traubeneiche als Vergleichsbaumart zur Buche in der hier vorgestellten Untersuchung.

2.7 Prognostizierte Auswirkungen des Klimawandels auf die Mortalität und Produktivität von Buchen und Eichen

Das Trockenstressrisiko bzw. die Produktivitätsveränderungen für Buchen und Eichen im Rahmen von verschiedenen Klimawandelszenarien wurden von verschiedenen Autoren im Rahmen von Modellierungen eruiert. ALBERT UND SCHMIDT (2010) schätzen beispielsweise das Trockenstressrisiko der Baumarten Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie für ganz Deutschland anhand verschiedener Klima- und Bodenvariablen ein. Eine Abfrage der Übersichtskarten von Buchen und Eichen im aufgebauten Decision Support Systems Wald und Klimawandel für Baden-Württemberg¹ ergibt hinsichtlich des Trockenstress-Risikos für die beiden Baumarten für den Zeitraum 2071 bis 2100 nur geringfügige Unterschiede. Grundlage für die Klimamodellierung ist das regionale Modell CLM (Climate Local Model) des Deutschen Wetterdienstes, welches wiederum auf dem IPCC-

¹ Online verfügbar unter: <http://www.dss-wuk.de/uebersichtskarten/>, abgefragt am 15.07.2014

Szenario B1 (NAKIĆENOVIĆ ET AL. 2000) basiert. Die Beurteilung des Trockenstress-Risikos wird in dem Modell von ALBERT UND SCHMIDT aus der Ausfallwahrscheinlichkeit des Bestandes abgeleitet. Es werden insgesamt 10 Risikostufen gebildet, wobei Stufe 1 ein Ausfallrisiko von 0 - 10 %, Stufe 2 ein Ausfallrisiko 10 - 20 %, etc. bedeutet (FORSCHUNGSZENTRUM WALDÖKOSYSTEME 2010). Das Ausfallrisiko wird wiederum aus dem baumartenspezifischen Leitfähigkeitsverlust des Xylems bei Trockenstress hergeleitet bzw. mit denen des Bodenwassers, den sogenannten *critical limits of soil water availability* (CL-SWA) gleichgesetzt (CZAJKOWSKI ET AL. 2009). CZAJKOWSKI ET AL. unterscheiden mit Hinweis auf eine Vielzahl von Quellen, u.a. auch mit Bezug auf die im vorangegangenen Kapitel bereits erwähnte Arbeit von TYREE UND COCHARD (1996) dabei zwischen folgenden baumartenspezifischen PLC Werten (ebenda, S. 88, Table 1):

	PLC10	PLC50	PLC90
Buche (<i>Fagus sylvatica</i>)	2.0	2.6	4.0
Stieleiche (<i>Quercus robur</i>)	2.0	3.0	4.0
Traubeneiche (<i>Quercus petraea</i>)	2.5	3.3	4.4

Der Traubeneiche hat also durchgängig höhere Grenzwerte für dieselben Verlustraten im Vergleich zur Stieleiche. Der Grenzwert für die Stieleiche liegt im Vergleich zur Buche nur im Bereich des 50%igen Verlusts der Leitfähigkeit höher. Da im Decision Support System Wald und Klimawandel von ALBERT UND SCHMIDT nur die Verlustgrenzen der Stieleiche implementiert sind², erklärt dies die geringen Unterschiede zwischen Buchen und Eichen in den abgefragten Übersichtskarten. Generell weisen CZAJKOWSKI ET AL. außerdem darauf hin, dass ihr Ansatz auf die Verjüngungsphase fokussiert. Dies erscheint folgerichtig, da die angegebenen PLC-Werte in ihrer überwiegenden Zahl ebenfalls auf Messungen an Jungpflanzen basieren. Auf eine weitere Schwäche des Ansatzes weisen CZAJKOWSKI ET AL. ebenfalls hin: Die Verwendung des Dunkelwasserpotenzials ist zur Beschreibung des kritischen Grenzwertes nur bedingt geeignet, da das Wasserpotenzial der Bäume in den Mittagsstunden sehr viel größer sein kann als das frühmorgendliche Potenzial und direkte Zusammenhänge zwischen beiden Größen nicht immer bestehen.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die aus den Modellierungen mit LWF-BROOK90 resultierenden Matrixpotenziale (siehe Kapitel 4.2) sich auf die Bodenmatrix beziehen und es sich dabei um mittlere Tageswerte für den Oberboden (0 – 60 cm) handelt. Der Ansatz von CZAJKOWSKI ET AL. geht davon aus, dass „das Dunkelwasserpotenzial in Beziehung zum Bodenmatrixpotenzial in jener Bodentiefe [steht], in der die Wurzelsysteme gerade noch Wasserressourcen nutzen können.“ (ebenda, S. 87). Damit sind die oben genannten Pre-Dawn-Werte nicht mit den in dieser Arbeit vorgestellten Modellergebnissen aus LWF-BROOK-90 vergleichbar.

BENITO ET AL. (2008) modellieren die Verbreitung von 20 Baumarten für die iberische Halbinsel unter der Annahme verschiedener Klimawandelszenarien. Dabei nutzen sie Inventurdaten zur aktuellen Verbreitung der Baumarten in Spanien und Portugal, um Klimahüllen für diese Baumarten zu erstellen und deren potenzielle aktuelle Verbreitung (paV) zu ermitteln. Anhand des IPCC-Szenarios A2 wird die Verbreitung der Arten auf der iberischen Halbinsel bis 2080 prognostiziert. Das A2-Szenario geht von einer Zunahme der Weltbevölkerung und einem heterogenen ökonomischen Wachstum aus, welche eine Erhöhung der mittlerer Lufttemperatur von 3°C für den Zeitraum 1971-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990 zur Folge hätte (NAKIĆENOVIĆ ET AL. 2000). Die Autoren berechnen für die Buche bis 2080 einen Flächenrückgang von 92.5 % im Vergleich zur paV. Noch höher liegt der ermittelte Flächenrückgang für die Traubeneiche, bei 96.7 % im Vergleich zur paV. Für die Stieleiche dagegen wird in Spanien und Portugal anhand des eingesetzten Modells ein Rückgang um "lediglich" 66.1 % im Vergleich zur paV vorhergesagt. Der überraschenderweise stärkere Rückgang für die Trauben im Vergleich zur Stieleiche resultiert möglicherweise in methodischen Schwierigkeiten aufgrund

² vgl. hierzu die Erklärung des Trockenstressmodells unter:
<http://www.dss-wuk.de/hintergrund/modelle/trockenstressmodell/>, abgefragt am 15.07.2014

der aktuell sehr geringen Verbreitung der beiden Baumarten. Die aktuelle Fläche der beiden Arten wird in Spanien und Portugal von den Autoren für die Traubeneiche auf lediglich knapp 700 km² und für die Stieleiche auf ca. 3350 km² beziffert.

Ebenfalls basierend auf dem IPCC-Szenario A2 (NAKIĆENović ET AL. 2000) modellieren NOTHDURFT ET AL. (2012) die Bonitätsveränderungen von den Hauptbaumarten in Baden-Württemberg in räumlicher und zeitlicher Auflösung. Datengrundlage ihrer Modellierungen sind die Forstinventurdaten und räumlich hoch aufgelöste Witterungsdaten von Temperatur und Niederschlag. Anhand dieser Daten erstellen die Autoren zwei Modelle: ein baumartenspezifisches Modell für die Schätzung der Oberhöhe basierend auf dem Alter der Bäume, sowie ein Regressionsmodell zur Abschätzung der Bonität aufgrund von Witterung und Topographie. Für den Vorhersagezeitraum 2041-2070 gehen sie dabei, bezogen auf das Referenzjahr 2007 für die Buche von einer Reduktion der Bonität v.a. im Bereich des Oberrheinischen Tieflandes, dem Westabfall des Schwarzwaldes und dem Neckarland von mehr als 25 % aus, während in weiten Teilen des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb die Bonität um ca. 10 % steigt. Für die Eiche sieht die Zukunft nach dieser Modellierung ähnlich aus, wobei die Zuwachsreduktion z.B. im Neckarland mit ca. 20 % nicht so stark ausfällt wie bei der Buche, wohingegen die Bonitätssteigerungen der Eiche im Bereich des Schwarzwaldes und der Schwäbischen Alb sogar bei ca. 20 % liegen.

Die drei genannten Beispiele zur Modellierung der Produktivität und Mortalität von Buchen und Eichen zeigen, dass die Modellansätze sehr unterschiedlich sein können und die Ergebnisse entsprechend hinterfragt und interpretiert werden müssen. Grundsätzlich hängt die Qualität der Modellierungsergebnisse immer von der Qualität der Eingangsdaten ab, was das Beispiel von BENITO ET AL. (2008) verdeutlicht. Auch der Detaillierungsgrad der in den Modellen abgebildeten Prozesse wirkt sich auf das Ergebnis aus, wie aus der Arbeit von ALBERT UND SCHMIDT (2010) hervorgeht. Obwohl die Ergebnisse des Modells von NOTHDURFT ET AL. (2012) plausibel erscheinen, weisen die Autoren auch darauf hin, dass der Einfluss von z.B. Nährstoffverfügbarkeit und Bodenwasserspeicherkapazität von ihnen nicht, zumindest nicht direkt, erhoben werden konnte. Daneben stellt sich die Frage, wie Extremereignisse z.B. in Form des Trockenjahres 2003 in der Vergangenheit konkret auf das Wachstum der untersuchten Baumarten gewirkt haben, und ob die aus singulären Ereignissen resultierenden Wachstumsveränderungen ausreichend in der Modellierung der zukünftigen Wachstumsverhältnisse abgebildet sind.

Die hier vorgestellte Arbeit setzt an diesem Punkt an und will einen Beitrag dazu leisten, die Wissenslücken in Bezug auf die Witterungs-Wachstumsbeziehungen von Buche und Traubeneiche, sowie zur Trockenstress-Toleranz der beiden Baumarten zu verringern.

2.8 Fragestellung und Hypothesen der Arbeit

Die dargestellte Aufarbeitung des aktuellen Wissenstandes hinsichtlich der Witterungs- und Trockenstress-Sensitivität von Buchen und Eichen haben zu folgender Generalhypothese für diese Arbeit geführt:

Mit zunehmender Sommertrockenheit nimmt die Konkurrenzkraft der Eiche gegenüber der Buche in Baden-Württemberg zu.

Um diese Fragestellung in Bezug auf das Höhen- und Dickenwachstum und im Hinblick auf die Unterschiede zwischen Trockenstress-Toleranz und Witterungs-Sensitivität deutlicher herauszuarbeiten, wurden folgende Teilhypothesen innerhalb von drei Themenkomplexen formuliert.

Trockenstress-Toleranz und Höhenwachstum/Höhenzuwachs:

- H1: Die höhere Konkurrenzkraft der Eiche nach Trockenstress zeigt sich in einer gegenüber der Buche geringeren Stress- bzw. schnelleren Erholungsreaktion im Höhenzuwachs im bzw. nach Trockenjahren.
- H2: Trockenjahre führen bei beiden Baumarten zu einer nachhaltigen Veränderung des „normalen“ Höhenwachstums.
- H3: Diese Veränderung hat zur Folge, dass Eichen im Höhenwachstum erst zu einem späteren Zeitpunkt von Buchen überholt werden.

Witterungs-Sensitivität und Dickenzuwachs:

In Bezug auf die Wasserverfügbarkeit wirken Niederschlag und Temperatur in der Vegetationszeit auf den Dickenzuwachs von Buchen und Eichen unterschiedlich:

- H4: Die Buche reagiert stärker als die Eiche auf Unterschiede im Niederschlagsniveau.
- H5: Die Buche reagiert stärker als die Eiche auf Unterschiede im Temperaturniveau.
- H6: Junge (ca. 60jährige) Buchen und Eichen reagieren auf Unterschiede im Niederschlags- und Temperaturniveau stärker als dies alte (ca. 120jährige) Buchen und Eichen tun.

Trockenstress-Toleranz und Dickenwachstum/Dickenzuwachs:

- H7: Im Dickenzuwachs zeigt sich die höhere Konkurrenzkraft der Eiche in einer gegenüber der Buche geringeren Einbruch- bzw. schnelleren Erholungsreaktion im bzw. nach den Trockenjahren (1976 und 2003).
- H8: Beide Reaktionen zum Dickenwachstum (Einbruch und Erholung) führen im Vergleich der beiden Baumarten zu einer höheren Resilienz der Eiche gegenüber Trockenstress.
- H9: Entlang eines Wasserverfügbarkeitsgradienten in Baden-Württemberg ist mit zunehmend knapper Wasserversorgung ein stärkerer Zuwachseinbruch und eine langsamer verlaufende Erholungsreaktion der Buchen erkennbar. Im Gegensatz dazu zeigt die Eiche diesen Gradienten in ihrer Trockenstressreaktion nicht.
- H10: Aufgrund der höheren Biomasse und der höheren Speicherkapazitäten sind die Trockenstressreaktionen im Dickenwachstum von älteren Buchen und Eichen (ca. 120jährig) geringer ausgeprägt als bei jüngeren Bäumen (ca. 60jährig).

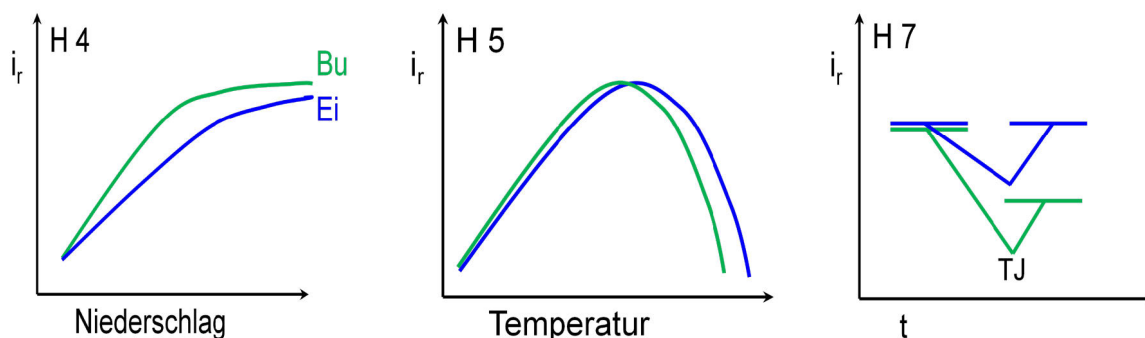


Abbildung 7: Visualisierung der Hypothesen H4 (links), H5 (Mitte) und H7 (rechts)

Die Grafik zur Hypothese H4 (Abbildung 7, links) zeigt, dass zwischen den Niederschlägen in der Vegetationsperiode und dem Dickenzuwachs der Buche deutlich positivere Zusammenhänge, angezeigt durch die stärkere Steigung, vermutet werden als bei der Eiche, angezeigt durch die flachere Steigung. Beide Baumarten nähern sich bei sehr hohen Niederschlägen asymptotisch einem maximalen Radialzuwachs an. Das maximale Niveau wird für die Buche etwas höher vermutet. Höhere Temperaturen (H5, Abbildung 7, Mitte) wirken dagegen zunächst positiv, und erst nachdem ein „Optimum“ überschritten ist, verkehrt sich die Wirkung der Temperatur ins Negative. Sowohl

hinsichtlich der positiven als auch der negativen Wirkungen zeigt die Buche stärkere Zusammenhänge, d.h. eine stärkere Steigung und einen stärkeren Abfall als die Eiche. Im Dreiecksdiagramm (H7, Abbildung 7, rechts) symbolisieren die linken horizontalen Linien das Zuwachsniveau vor dem Trockenjahr (TJ) und die rechten horizontalen Linien das Zuwachsniveau nach dem Trockenjahr. Je stärker der Radialzuwachseinbruch im Trockenjahr, desto tiefer die Einkerbung des Dreiecks. Diese Art der Darstellung für die Trockenstressreaktion wird in Kapitel 3.4.3.5 eingeführt.

3 Material und Methoden

3.1 Auswahl des Untersuchungsmaterials

3.1.1 Vorüberlegungen und iterativer Prozess zur Auswahl der Untersuchungsbestände

Um möglichst gleiche Wachstumsbedingungen für die beiden Baumarten zu gewährleisten, sollte die Untersuchung in Buchen-Eichen-Mischbeständen in Baden-Württemberg durchgeführt werden. Interessant schien weiter die Frage, ob verschieden alte Bestände unterschiedlich auf Trockenereignisse reagieren, weshalb zwei Alterskollektive mit einem Zielalter von 60 und 120 Jahren anvisiert wurden. Um ggf. unterschiedliche Zuwachsreaktionen auf verschiedenen wasserversorgten Standorten abbilden zu können, sollten die Bestände außerdem entlang eines Wasserhaushaltsgradienten ausgewählt werden. Die sonstigen Standortsbedingungen, v.a. die Durchwurzelbarkeit des Bodens und der Nährstoffhaushalt, sollten an den Untersuchungsstandorten möglichst ähnlich sein.

Hinsichtlich der Diskussion, welche der beiden Eichenarten eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Dürre aufweist, sei auf Kapitel 2.1.3 verwiesen. Von den beiden in Baden-Württemberg verbreiteten Eichenarten findet sich an der Trockenheitsgrenze zu den nahezu reinen Buchenbeständen in der Regel die Traubeneiche als Mischbaumart zur Buche ein. Die Stieleiche ist nur in Ausnahmefällen, z.B. auf Felsköpfen im kontinental geprägten Klima der Schwäbischen Alb, auf für die Buche zu trockenen Standorten zu finden, ist jedoch ansonsten vor allem in den gut wasserversorgten Hartholzauwäldern an Rhein, Main und Donau verbreitet (OBERDORFER 1992). Deshalb wurde für diese Untersuchung entschieden, sich ausschließlich auf Buchen-Traubeneichen-Mischbestände zu konzentrieren.

Weiteres Ziel bei der Bestandesauswahl war nun eine ähnliche Nährstoffversorgung der potenziellen Untersuchungsstandorte zu gewährleisten und am trockenen Ende des angestrebten Wasserhaushaltsgradienten den basenarmen-trockenen Verbreitungsrand der Buche in Baden-Württemberg im Untersuchungsdesign abzubilden. Nachdem im Winter 2010/11 eine Pilotstudie in zwei süd(west-)exponierten Beständen am relativ niederschlagsreichen Westabfall des Schwarzwaldes durchgeführt werden konnte, konzentrierte sich die Suche weiterer Untersuchungsbestände auf Regionen in Baden-Württemberg, die aufgrund des geologischen Ausgangssubstrats (Granit, Gneis, Sandsteine) eine ähnliche Bodenentwicklung und Nährstoffversorgung erwarten ließen, in denen aber mit deutlich geringeren Niederschlägen zu rechnen war. Folgende Einzelwuchsbezirke (EWB), bzw. Wuchsbezirke (WB) und geologische Ausgangsformationen kamen dafür in Frage:

- Hardtwaldungen (EWB: 1/02) mit entkalkten quartären Dünen und Flugsanddecken
- Stromberg (EWB: 4/10) mit Stuben- und Schilfsandstein
- Schönbuch und Rammert (WB: 4/13a und b) mit Stuben- und Schilfsandstein

Möglich gewesen wäre auch eine Ausdehnung des Suchrasters bis in den Odenwald, aufgrund der dort gegebenen vielfachen Durchmischung der Bestände mit anderen Baumarten (Odenwälder Mischaat) wurde dieses Wuchsgebiet jedoch zunächst ausgeklammert.

GIS-Abfragen auf der Grundlage der Forsteinrichtungsdaten des Staatswaldes Baden-Württemberg in den oben genannten Regionen erfolgte anhand folgender Auswahlkriterien:

- Bestandesfläche: $\geq 0,5$ ha
- Buchen- und Eichenanteil: ≥ 10 %
- Altersstufe: ≥ 5 , d.h. Bestände mit einem mittleren Alter von mehr als 50 Jahren

- spezifische Ökoserien, zur Auswahl basenarmer, nicht wechselfeuchter oder staunasser Standorte, welche die Traubeneiche bei der Baumartenwahl berücksichtigt, d.h. die Traubeneiche ist entweder im Standortswald (ALDINGER ET AL. 1998; MICHIELS 2014) enthalten oder wird als geeignete Baumart im Sinne der Standortkartierung (ALDINGER, MICHIELS 1997) angesehen. Die in den verschiedenen Naturräumen entsprechenden berücksichtigten Ökoserien und Standortseinheiten sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Da die Forsteinrichtungsdaten nicht wuchsbezirksbezogen vorlagen, wurden die GIS-Abfragen für folgende Land- und Stadtkreise, welche Anteile in den o.g. EWB/WB, bzw. am des Westabfall des Schwarzwaldes haben, durchgeführt.

- Baden-Baden, BAD
- Böblingen, BB
- Breisgau-Hochschwarzwald, FR-Land
- Emmendingen, EM
- Enzkreis, PF-Land
- Freiburg, FR-Stadt
- Heilbronn Land, HN
- Heidelberg, HD-Stadt
- Karlsruhe, KA-Stadt und KA-Land
- Ludwigsburg, LB
- Lörrach, LÖ
- Ortenaukreis, OG
- Rastatt, RA
- Rhein-Neckar-Kreis, HD-Land
- Tübingen, TÜ

Aufgrund der Bestandesbeschreibungen wurden in den Regionen einzelne Bestände vorausgewählt und vor Ort in Augenschein genommen. Dabei stellte sich heraus, dass die Bestände in den Hardtwaldungen aufgrund der beträchtlichen Maikäferschäden ungeeignet für die Untersuchung sind und im Schönbuch und Rammert es auf den geforderten durchlässigen Substraten kaum Bestände gibt, welche die erforderliche einzelbaumweise Beimischung der Eiche aufwiesen. Insgesamt war in einer Vielzahl der vorausgewählten Bestände eine einzelbaumweise Mischung nicht gegeben. Die überwiegende Zahl der Bestände weisen eine gruppen- oder horstweise Beimischung der Eiche auf, wobei diese vielfach auf den trockeneren Oberhängen anzutreffen ist, während die Buche, die meist in größeren Anteilen als die Eiche vertreten ist, auf den Unter- und Mittelhängen stockt.

Tabelle 2: Übersicht der in das Suchraster fallenden ausgewählten Ökoserien und Standortseinheiten

Fett gedruckte Sigel der Standortseinheiten bedeuten, dass die Traubeneiche im Standortswald enthalten ist.

Name der Ökoserie	Sigel der Standortseinheiten ^{*1}
Einzelwuchsbezirk 1/02: Hardtwaldungen	
schwach, lehmige Sande	Ti(l)S, (l)S, h(l)S, (l)S-
kiesgründige, schwach lehmige Sande	tikg(l)S, kg(l)S, hkg(l)S, kg(l)S-
kiesgründige, lehmige Sande	tikgS, kglS
sandgründige, lehmige Sande	tisgS, sgS, kagS,
Dünensande	DS, DS- , DS= ,
Wuchsbezirk 3: Schwarzwald	
lehmige Grusböden	IG+, sIG+, IG, sIG, sslG, IG-, sIG-; sslG-;
lehmige Grushänge	nrIGH+, IGH, IGH- , IgWH+, IgWH, slgWH, sslgWH, IgWH- , slgWH- , IgSH+, IgSH , slgSH, sslgSH, IgSH- , slgSH- , sslgSH-
lehmige Steinschuttböden	ISt+, ISt, slSt, slSt-, ISt- ,
lehmige Steinschutthänge	IStWH+; IStWH, slStWH, sslStWH, IStWH- , slStWH, slStWH- , IStSH+, IStSH, slStSH, IStSH- , slStSH-
Steinschutthänge	StWH, StWH-, StSH, StSH-
durchlässige Sande	S+, S, sS, S-, spS; pS
sandige Flachhänge	sFH, sFH-
lehmiger Sand	nrIS+, gS, IS, sIS, IS- , vsIS-
lehmig-sandige Flachhänge	IsFH, slsFH
Sandhänge	SH+, SH, SH- , vsSH-
nicht vernässende Buntsandstein-Mischlehme	ML+, ML, ML- , vsML-
Buntsandstein-Mischlehmhänge	MLH+, MLH, vsMLH-
Buntsandsteinhänge	BH, BH-
sandige Buntsandstein-Steilhänge	SWH+, SWH, pSWH, pSWH- , SSH+; SSH, pSSH, SSH-
lehmig-sandige Buntsandstein-Steilhänge	IsWH, slsWH, IsSH,
Block- und Felshänge im Grundgebirge	BIH-
blockige und felsige Extremeinheiten (trockener saurer Hang)	trsH
Rücken und Hangrücken	Rü , Rü- , blRü-
Rücken und Hangrücken im Buntsandstein	BSRü, BSRü-
nicht oder wenig vernässende Quarzitlehme und der Quarzitlehmhänge	QL, QLH, QL- , QLH-
Schroffhänge	SchrH-
Einzelwuchsbezirk 4/10: Stromberg	
nicht vernässende Sande	S, sS, S-, ssS,
nicht vernässende steinig-schluffige Feinsande	FS, FS-
Sandhänge	SH+, SH, sSH, SH- , ssSH-
Einzelwuchsbezirk 4/13a und b: Schönbuch und Rammert	
Nicht vernässende Sandböden	S, sS, ssS, S-, ssS-, FS, FS-, ssFS-, StpfS, StpfS-
Nicht oder wenig vernässende lehmig-steinige Rät-Verwitterungsdecken	RVD , RVD- ,
Sandhänge	SH+, SH, sSH , SH- , ssSH- , FSH

^{*1} Die den Großbuchstaben (=Abkürzung der Ökoserie) vorstehenden Kleinbuchstaben bedeuten: bl = blockreich, ka = kalkgründig, kg = kiesgründig, l = lehmig, (l) = schwach lehmig, nr=nährstoffreich, sg = sandgründig, s =sauer, ss = stark sauer, ti = tiefgründig, trs = trocken-sauer, vs = versauert. Die der Buchstabenkombination nachfolgenden Zeichen bedeuten: - = mäßig trocken, + = frisch, ohne Zeichen: mäßig frisch.

3.1.2 Kurzvorstellung der ausgewählten Untersuchungsbestände

Letztendlich konnten am „Westabfall des Schwarzwaldes“ (im Folgenden auch kurz „Schwarzwald“ genannt) und im „Stromberg“ jeweils vier Bestände auf Nord- und Südhänge ausgewählt werden, wobei Kompromisse hinsichtlich des flächigen Vorhandenseins der gewünschten durchlässigen

Standortseinheiten und des gesuchten Altersrahmen hingenommen werden mussten. Die Bestände im Schwarzwald stocken auf lehmig-grusigen Hängen deren bodenbildendes Ausgangssubstrat Granite oder Gneise sind. Die Bestände im Stromberg, dessen geologische Basis Stuben- und Schilfsandsteine bilden, befinden sich überwiegend auf mäßig-frischen und mäßig-trockenen sandig-lehmigen Hängen. In beiden Regionen stocken die Untersuchungsbestände auf Braunerden, die v.a. an den Südhängen podsolig ausgebildet sein können. Pflanzensoziologisch lassen sich alle Bestände dem bodensauren, mitteleuropäischen Buchenwald-Unterverband der Moderbuchenwälder (LUZULO-FAGENION) zuordnen. Innerhalb dieses Unterverbands können die Bestände der Waldgesellschaft des „Hainsimsen-Buchenwaldes“ (Luzluo Fagetum (typicum)) zugeordnet werden, an den Südhängen bestehen Übergänge zu „Armen Moderbuchenwäldern“ (Luzluo-Fagetum-vaccinietosum) an den Nordhängen zu „Armen Braunmull-Buchenwäldern (Galio odorati-Fagetum luzuletosum) (ELLENBERG, LEUSCHNER 2010). Nach der aktuellen Kartierung der potenziellen natürlichen Vegetation von Baden-Württemberg (REIDL ET AL. 2013) können die Untersuchungsstandorte am Westabfall des Schwarzwaldes den Pflanzengesellschaften „Hainsimsen-Buchenwald“ im Übergang zu „Habichtskraut-Traubeneichenwald“ zugeordnet werden (Kartierkomplex 37). Die Untersuchungsbestände im Stromberg liegen ebenfalls im „Hainsimsen-Buchenwald“ im Übergang zu „Waldmeister- oder Waldgersten-Buchenwald“ örtlich mit „Traubeneichen-Buchen-Hainbuchenwald“ (Kartierkomplexe 35, 46 und 39).

In Tabelle 3 sind die Untersuchungsbestände, deren Zugehörigkeit zu den Naturräumen bzw. Landkreisen, deren Exposition und mittlere Höhenlage, d.h. das Mittel der zehn Untersuchungsbäume, sowie grundlegende Daten der Forsteinrichtung und die relevanten Standortseinheiten der Standortkartierung aufgeführt.

Tabelle 3: Übersicht der ausgewählten Untersuchungsbestände

Die angegebenen Kürzel der Standortseinheiten sind in Tabelle 2 erläutert. Es sind die Standortseinheiten angegeben, auf denen die ausgewählten Untersuchungsbäume stocken.

Standort	Region (Landkreis)	Exposition	Mittlere Höhenlage [m üNN]	Waldbesitzer	Distrikt/Abteilung/Bestand (FE-Stichtag)	Standortseinheiten
J u n g b e s t ä n d e						
Heuweiler (HW)	Schwarzwald (FR-Land)	Nordost	378	Staat	31/1/e ⁷ (1.1.2007)	IgWH, IWH, gLH
Sulzburg (SU)	Schwarzwald (FR-Land)	Südwest	507	Staat	71/1/b ⁶ (1.1.2007)	IStSH-, IStH-, IGH-
Leonbronn (LN)	Stromberg (HN)	Nord	332	Staat	47/7/e ⁶ (1.1.2002)	SH, T
Spielberg (SP)	Stromberg (HN)	Süd	390	Staat	44/11/e ⁵ (1.1.2002)	SH-, SH
A l t b e s t ä n d e						
Lautenbach (LT)	Schwarzwald (OG)	Nordost	458	Staat	63/7/a ^{15/3} (1.1.2011)	IgWH, StWH
Attental (AT)	Schwarzwald (FR-Land)	Süd	426	Staat	29/0/b ¹¹ (1.1.2007)	kRü-, IStH, sIGH-
Sternenfels Nordhang (SN)	Stromberg (PF-Land)	Nord	257	Gemeinde Sternenfels	3/4/e ¹¹ (1.1.2011)	SH
Sternenfels Südhang (SS)	Stromberg (PF-Land)	Süd	212	Staat	1/0/e ¹⁴ (1.1.2011)	SH-

Im Folgenden sind die vollständigen Namen der betroffenen Standortseinheiten, inklusive der Namen der Standortswälder angegeben. Auf diesen Standortseinheiten stockten die

Untersuchungsbäume in den jeweiligen Untersuchungsregionen (vgl. hierzu auch die Karten mit der Lage der Untersuchungsbäume und den kartierten Standortseinheiten im Anhang 1). Mit dem Standortwald wird im baden-württembergischen standortkundlichen Verfahren die lokale natürliche Baumartenzusammensetzung im Anhalt an das Konzept der heutigen potenziellen natürlichen Vegetation wiedergegeben (ALDINGER ET AL. 1998; TÜXEN 1956). Damit wird deutlich, dass - zumindest auf den Südhängen - Standorte ausgewählt wurden, auf denen die Traubeneiche auch aufgrund der natürlichen Baumartenzusammensetzung der Bestände, einigermaßen konkurrenzkräftig zur Buche wäre.

Betroffene Standortseinheiten im Schwarzwald:

gLH: Buchenwald auf mäßig frischem grusigem Lehmland

kRü-: Buchen-Traubeneichen-Wald auf mäßig trockenen Rücken und Hangrücken

IGH-: Buchen-Traubeneichen-Wald auf mäßig trockenem lehmigem Grushang

IStSH-: Buchen-Traubeneichen-Wald auf mäßig trockenem lehmigem Steinschutt-Sommerhang

IStH-: Traubeneichen-Wald auf mäßig trockenem lehmigem Steinschutthang

IgWH: Buchen-Tannen-Bergahorn-Wald auf frischem lehmig-grusigem Winterhang

IWH: Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem lehmigem Winterhang

StWH: Buchen-Tannen-Wald auf mäßig frischem Steinschutt-Winterhang

Betroffene Standortseinheiten im Stromberg:

SH: Buchenwald auf mäßig frischem Sandhang

SH-: Buchen-Traubeneichen-Wald auf mäßig trockenem Sandhang

T: Buchen-Traubeneichen-Hainbuchen-Wald auf mäßig frischem Ton

3.1.3 Auswahl der Untersuchungsbäume für die Analyse des Höhen- und Radialzuwachses

Pro Bestand wurden zehn Untersuchungsbäume, d.h. fünf Buchen und fünf Traubeneichen, ausgewählt. Die Untersuchungsbäume wurden in Bestandesbereichen ausgewählt, in denen die beiden Baumarten einzelbaumweise gemischt vorkommen. D.h. die unmittelbaren Nachbarn der Untersuchungsbäume sind im Idealfall zur Hälfte Buchen und zur Hälfte Eichen. Es wurden ausschließlich (vor-)herrschende Bäume, d.h. Bäume der KRAFT'schen Klassen I und II (KRAFT 1884) als Untersuchungsbäume ausgewählt, wobei idealerweise eine (vor-)herrschende Buche neben einer (vor-)herrschenden Traubeneiche stand, so dass Baum-Paare gebildet werden konnten. Wo die unmittelbare Nachbarschaft nicht direkt gewährleistet werden konnte, was aufgrund insgesamt geringerer Baumzahlen pro Hektar v.a. in den Altbeständen der Fall war, wurde darauf geachtet, dass beide Bäume des Paares zumindest auf der gleichen Höhenlinie lagen, so dass von einer insgesamt sehr ähnlichen Wasserversorgung des Paares ausgegangen werden kann. Die Auswahl wurde auf (vor-)herrschende Bäume begrenzt, da bei diesen am ehesten von einem von Konkurrenz unbeeinträchtigten Dickenwachstum ausgegangen werden kann und Radialzuwachsschwankungen weniger von der waldbaulichen Behandlung beeinflusst sind. Dennoch kann aufgrund dieses Auswahlverfahrens nicht davon ausgegangen werden, dass die aktuell (vor-)herrschenden Bäume auch im Verlauf des bisherigen Bestandeslebens nicht Phasen durchlebt haben, in denen sie stärker bedrängt waren. Daneben zeigt z.B. VAN DER MAATEN (2012), dass Buchen der Klassen 1-2 besonders empfindlich auf Trockenstress reagiert haben, während Bäume der Klasse 3 weniger anfällig waren. Neben dem Kriterium der „(Vor-)Herrschaft“ wurde darauf geachtet, dass die Bäume möglichst tief ansetzende, vitale Kronen und keine Beeinträchtigung durch Fäll- oder Rückeschäden zeigten. Im Anhang 1 ist die detaillierte Lage der Untersuchungsbäume für alle Bestände mittels Karten dargestellt.

3.1.4 Auswahl der Untersuchungsbäume für die genetische Analyse

Für die ausgewählten Eichen sollte sichergestellt werden, dass es sich dabei um Traubeneichen handelt und ob sie autochthonen Ursprungs sind. Deshalb wurde die Chloroplasten-DNA sowie die

Kern-DNA an verschiedenen Mikrosatellitengenorten aller fünf Eichen pro Bestand untersucht. Die Untersuchungsbestände im Schwarzwald wurden gleichzeitig als Untersuchungsbestände für das Interreg-Projekt „Die Verjüngung der Eiche im oberrheinischen Tiefland“ (QREG) genutzt. Die Probenahme in diesen Beständen erfolgte deshalb analog zum bei NEOPHYTOU (2012) beschriebenen Verfahren. Dabei wurde in die Bestände ein systematisches Stichprobenraster mit einem Abstand von 30x30m eingelegt. Die dem Rasterpunkt am nächsten stehende Eiche, wurde für die Probenentnahme ausgewählt, unabhängig von deren sozialer Stellung.

3.1.5 Lage der Bodenprofile und Felderhebung wichtiger Bodenparameter

Zur detaillierteren Beschreibung der Untersuchungsstandorte und zur Datenaufnahme für das aufzustellende Bodenwasserhaushaltsmodell (vgl. Kapitel 3.3.7) wurden in allen Untersuchungsbeständen drei Bodenprofile mit einer Tiefe von 60 bis 70 cm angelegt. Die drei Bodenprofile sollten die Heterogenität der Standorte pro Untersuchungsbestand abbilden und wurden deshalb - wo möglich - zwischen einem Baumpaar platziert. Daneben wurde darauf geachtet, dass das im Untersuchungsbestand vorhandene Standortsspektrum, also verschiedene Standortseinheiten und verschiedene Hangsituationen, mit den Bodenprofilen abgedeckt wurde. Die Karten im Anhang 1 zeigen die genaue räumliche Lage der Bodenprofile zwischen den Untersuchungsbaumen.

3.2 Angewandte Feldmethoden und Probenentnahmen

3.2.1 Aufnahmen am stehenden Baum

Nachdem die Untersuchungsbaume ausgewählt waren, wurden diese mit Signierfarbe markiert und zwar mit einem Ring auf Brusthöhe, einem vertikalen Strich an der Nordseite und mit der Baum-Nummer. Anschließend wurden folgende einzelbaumweisen Parameter an jedem Untersuchungsbaum aufgenommen:

- Ansprache der sozialen Stellung nach KRAFT (KRAFT 1884)
- Messung des Brusthöhendurchmesser mit Umfangmaßband
- Messung der Baumhöhe mit Vertex IV (HAGLÖF AB)
- Messung des Kronenansatzes I, d.h. des erster lebenden Primärastes, mit Vertex IV
- Messung des Kronenansatzes II, d.h. der Höhe der untersten Schattblätter der Krone, mit Vertex IV
- Ermittlung der exakten geographischen Koordinaten mit GPS (GARMIN Etrex oder GARMIN Oregon)
- Ermittlung der Höhenlage mit GPS (GARMIN Etrex oder GARMIN Oregon) und mit barometrischem Höhenmesser (THOMMEN-Classic TX-22)
- Ermittlung der Exposition mit Kompass (SUUNTO, KB-14D, 360°-Teilung)
- Ermittlung der Hangneigung mit Klinometer (SUUNTO, PM-5/360PC)
- Ermittlung der Kronenschirmfläche

Die Kronenschirmflächenermittlung wurde nach dem bei SPIECKER (1996) beschriebenen Verfahren durchgeführt. Dabei wird die Kronenperipherie gutachterlich unter Einbezug markanter Ein- und Ausbuchtungen der Krone abgelotet. Die auf den Waldboden projizierte Kronenschirmfläche wurde mit acht entlang der Kronenradien verteilten Fluchtstäben gekennzeichnet. Der Abstand der einzelnen Fluchtstäbe zum Stamm des Untersuchungsbaumes wurde mittels Laser-Entfernungsmesser (LEICA DISTO D210) oder, wo dies nicht möglich war, mittels Maßband in horizontaler Richtung bestimmt. Daneben wurde vom Stamm aus die Himmelsrichtung der Fluchtstäbe mittels Kompass (SUUNTO, KB-14, 360°-Teilung) ermittelt. Die Berechnung der Kronenschirmfläche erfolgte später anhand der gewonnenen Daten mit dem an der Professur für Waldwachstum entwickelten Programm „Kronenberechnungen“.

- Ermittlung der Konkurrenzsituation
Zur Beschreibung der Konkurrenzsituation des Untersuchungsbaumes wurden Baumart, BHD, Himmelsrichtung und horizontale Distanz der sechs nächsten Konkurrenten bestimmt, wobei hier nur Bäume bis zur Kraft'schen Klasse 3 (gering mitherrschend) betrachtet wurden.

Nachdem der Untersuchungsbaum gefällt war, wurde mit dem Winkelprisma (Zählbreite 2) die für den Untersuchungsbaum maßgebliche Grundfläche ermittelt. D.h. als Mittelpunkt für die Aufnahme wurde der Stock des gefällten Baumes gewählt.

Die Außenaufnahmen erfolgten für die Standorte Attental und Sulzburg im Winter 2010/11, für alle übrigen Standorte im Winter 2011/12.

3.2.2 Aufnahmen am liegenden Baum

Unmittelbar nach der Fällung der Bäume wurde die Baumlänge mit einem entlang der Hauptachse des Stammes gespanntem Maßband vermessen. Außerdem wurden die Entnahmehöhen für die Stammscheibentnahmen (1.3 m, 5 m, 10 m, 15 m, ggf. 20 m, ggf. 25 m, ggf. 30 m) und die Nordrichtung an diesen Stellen mittels Taschenreißhaken angezeichnet.

Es folgte die Bestimmung der jährlichen Höhentriebe am Hauptwipfeltrieb anhand der sichtbaren Triebbasisnarben. Diese wurden mittels Signierfarbe hervorgehoben. Wenn der Hauptwipfeltrieb beim Fällvorgang abgebrochen war, wurde versucht die abgebrochenen Teile in der unmittelbaren Umgebung zu finden und so den Hauptwipfeltrieb zu rekonstruieren. Wo dieses nicht gelang, wurde ein zweiter starker Wipfeltrieb ausgewählt und die Höhentriebe an diesem ermittelt. Laut (ROLOFF 2001, 47) sind "Die Triebbasisnarben ... bei der Buche besser und länger als bei jeder anderen Baumart zurückzuverfolgen ... ohne Probleme 10 Jahre, mit etwas Einarbeitung bis zu 40 Jahre." Bei dieser Untersuchung war es bei den Bäumen aus den Altbeständen möglich, die Triebbasisnarben 10 bis 20 Jahre im Schnitt 15 Jahre zurückzuverfolgen. Danach konnten die Triebbasisnarben, trotz des Einsatzes einer Wurzelbürste zur Entfernung von Flechten, nicht mehr eindeutig identifiziert werden. Bei den Jungbeständen konnten die Triebbasenlängen 10 bis 15 im Schnitt 12 Jahre zurückverfolgt werden. Speziell bei den Eichen kann aufgrund der ausgeprägten Johannistriebbildung nicht zwischen „echten“, d.h. aufgrund eines Jahrestriebes entstandenen, oder „unechten“, d.h. aufgrund von Johannistrieben entstandenen, Triebbasisnarben unterschieden werden (vgl. hierzu DAMMANN ET AL. 2009 und ROLOFF 2001). Deshalb wurden für eine Überprüfung im Labor bei den Eichen an allen erkannten Triebbasisnarben ca. 5 cm lange Astproben entnommen, welche die „echte“ oder „unechte“ Triebbasisnarbe beinhalteten (vgl. hierzu Abbildung 9). An der oberen und unteren Querschnittsfläche dieser Astproben wurden im Labor die Jahrringe ausgezählt, um so die Höhenwachstumsgrenzen eindeutig bestimmen zu können. Bei nicht mehr eindeutig identifizierbaren Triebbasisnarben der Buche wurde ebenso verfahren.

3.2.3 Probengewinnung für die spätere Bestimmung der Radialzuwächse

Die Stammscheiben in den o.g. Höhen wurden von einem erfahrenen Motorsägenführer entnommen und auf der Unterseite sofort mit Standortskürzel, Baum-Nr., Entnahmehöhe und Nordrichtung beschriftet. Außerdem wurde ein dreieckiger Keil zur späteren genauen Altersbestimmung aus dem Stock entnommen und zwar in der Art, dass das Mark enthalten war und die Radiuszuwächse möglichst gleichmäßig darauf abgebildet waren.

3.2.4 Probengewinnung für die spätere Bestimmung der Höhenzuwächse

Neben der bereits in Kapitel 3.2.2 angesprochenen Entnahme der Astproben zur Unterscheidung zwischen „echten“ und „unechten“ Triebbasisnarben wurde ein Verfahren entwickelt, um das Höhenwachstum um das Trockenjahr 1976 bei den Jungbeständen möglichst detailliert ermitteln

zu können. Da die Triebbasisnarben bei beiden Baumarten an den ausgewählten Untersuchungsbäumen in keinem Fall bis zum Jahr 1976 zurückzuverfolgen waren und andere getestete Methoden zur Ermittlung des Höhenwachstums fehl schlugen, fiel die Wahl der Methode zur Rekonstruktion des Höhenwachstums um das Jahr 1976 auf die engmaschige Entnahme von Kronenscheiben und die Ermittlung des jährlichen Höhenzuwachses aufgrund von ausgezählten Jahrringen. Zur Bestimmung der Höhe am Stamm, an der mit der Entnahme der Kronenscheiben begonnen werden sollte, wurde der mittlere jährliche Triebblängenzuwachs für die Jahre berechnet, die anhand der Triebbasisnarben bestimmt werden konnten. Die Entnahmehöhe ergab sich dann aus dem so berechneten mittleren Triebblängenzuwachs multipliziert mit der Anzahl der Jahre die zwischen Fälldatum und dem Jahr 1976 lagen (35, bzw. 36 Jahre). Dabei wurde angestrebt, für alle Bäume das Höhenwachstum bereits ab dem Jahr 1973 in jährlicher Auflösung beschreiben zu können. Von der Spitze des Hauptwipfeltriebes wurde also die berechnete mittlere Trieblänge multipliziert mit 38 bzw. 39 Jahre abgezogen und an dieser Stelle mit der Kronenscheibentnahme begonnen. Bei den Eichen und bei einigen gutwüchsigen Buchen konnte in der Regel direkt nach Entnahme der ersten Kronenscheibe mittels einer Lupe die Anzahl der auf der Scheibe vorhandenen Jahre verifiziert werden. Wenn das Jahr 1973 (noch) nicht auf der Scheibe vorhanden war, musste die Kronenscheibentnahme entsprechend nach unten fortgesetzt werden. Nach oben erfolgte die Kronenscheibentnahme entweder bis zum Jahr 1980, oder bis zum Anschluss an die erkannten Triebbasisnarben. In einigen wenigen Fällen, v.a. bei Buchen auf Südhängen, war es nicht möglich die Jahrringe vor Ort ohne weitere technische Hilfsmittel auszuzählen. In diesen Fällen mussten die Kronenscheiben zuerst im Labor präpariert und die Anzahl der Jahrringe dann unter dem Stereomikroskop ausgezählt werden. Nur so konnte sichergestellt werden, dass das Jahr 1973 tatsächlich auf der Scheibe vorhanden war. In Ausnahmen wurden bei einem zweiten Termin nochmals Kronenscheiben aus dem vor Ort gekennzeichneten Kronenmaterial gewonnen, um die Höhenwachstumsrekonstruktion zu vervollständigen. Da der jährliche Höhenzuwachs bei Buchen und Eichen im Alter von 60 Jahren laut den „Zuwachstabellen für Waldbestände“³ (Bösch 2002) zwischen 20 und 30 cm liegt, wurde der Abstand zwischen den zu entnehmenden Kronenscheiben auf 30 cm festgelegt.

Bei den Altbeständen wurde auf eine möglichst jahresgenaue Rekonstruktion des Höhenzuwachses verzichtet, da die Bedeutung des Höhenwachstums mit fortschreitendem Alter für die Konkurrenz zwischen den beiden Baumarten zunehmend an Bedeutung verliert. Außerdem sind die untersuchten Altbestände aufgrund der Schwierigkeiten bei der Bestandesauswahl (vgl. Kapitel 3.1.2) in ihrem mittleren Alter so heterogen, dass die vergleichende Höhenwachstumsanalyse dieser Bestände nach dem Trockenjahr 1976 immer von diesen sehr unterschiedlichen Ausgangsvoraussetzungen erschwert worden wäre. In den Altbeständen wurde deshalb im Kronenbereich ein Scheibenabstand von 100 cm gewählt, um anhand des üblichen Prozedere der Stammanalyse (vgl. Kapitel 3.3.3) eine näherungsweise Bestimmung der länger zurückliegenden Höhenzuwächse vornehmen zu können.

3.2.5 Probengewinnung für die genetischen Analysen

Von den aufgrund des Rasternetzes ausgewählten Eichen wurde in der Untersuchungsregion Schwarzwald entweder aus erreichbaren Knospen, oder von den Wurzelanläufen mittels Locheisen Kambialgewebe von 25 bis 30 Eichen pro Bestand gewonnen. Falls die ausgewählten Bäume für die Analyse des Radial- und Höhenanalyse nicht vom Stichprobenraster erfasst wurden, wurden diese zusätzlich beprobt. Bei den Beständen im Stromberg, die außerhalb der Projektregion des QREG-Projektes lagen, und von den für diese Untersuchung im Schwarzwald gefälltten Bäumen wurden

³ Stand 2001, bearbeitet von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Freiburg, herausgegeben vom Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg

an den für die Radial- und Höhenanalyse gefälltten Bäumen Knospenproben aus den Zweigen der Lichtkrone entnommen.

3.2.6 Bodenaufnahmen und Bodenproben

Für die Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells (vgl. Kapitel 3.3.7) wurden verschiedene Eingangsgrößen benötigt, die anhand der gegrabenen Bodenprofile erhoben wurden. Diese Bodenprofile wurden nach dem vom ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996) vorgeschlagenen Verfahren angelegt. Die genetischen Bodenhorizonte wurden an der Profilwand abgegrenzt und entsprechend beschrieben (vgl. Anhang 2). Die Bodenart wurde mittels Fingerprobe anhand eines Dreieckschlüssels (HILDEBRAND ET AL. 2006) bestimmt. Mit einem Zählrahmen, der eine Rasterbreite von vier cm hatte, wurde die Anzahl der Feinwurzeln in den Tiefenstufen 0-20 cm, 20-40 cm und 40-60 cm unabhängig von der Baumart ermittelt.

Für die Berechnung von Trockenraumdichte und Skelettgehalt wurden zwei Verfahren der Volumenersatzprobe durchgeführt. In steinigigen Profilen wurde aus jeder Tiefenstufe entlang der Profilwand ca. 5 Liter Bodenmaterial entnommen und der entstandene Hohlraum zur Quantifizierung des entnommenen Bodenvolumens in natürlicher Lagerung mit Perlit verfüllt (vgl. Foto 1). Das im Hochbau als Dämmmaterial verwendete Perlit ist ein chemisch und physikalisch umgewandeltes vulkanisches Glas (Obsidian) und hat eine spezifische Schüttdichte. Die zur Befüllung notwendige Menge wurde vorher im Messbecher bestimmt. An wenigen steinigigen Profilen in der Untersuchungsregion „Stromberg“ konnte anstelle der amorphen Hohlräume und deren Perlit-Wiederbefüllung mit Stechzylinder, die ein normiertes Entnahmevermögen von 200 cm³ haben, gearbeitet werden (vgl. Foto 2). Das entnommene Bodenmaterial wurde zum Transport in Plastiksäcke verpackt und unmittelbar im Anschluss an die Außenaufnahmen zur Lufttrocknung in Aluminiumschalen zwischengelagert.



Foto 1: Volumenersatzprobe: Hohlraum der durch die Entnahme des Bodenmaterials entstanden ist wird mit Perlite wieder befüllt



Foto 2: Stechzylinder zur Entnahme von 200 cm³ Bodenmaterial in wenig steinigigen Bodenprofilen

3.3 Angewandte Labormethoden

3.3.1 Stamm- und Kronenscheibenpräparation und -vermessung

Die entnommenen Stamm- und Kronenscheiben wurden zunächst im Holzlager der Professur für Waldwachstum luftgetrocknet und anschließend mit verschiedenen Körnungen geschliffen. Dabei

wurden für beide Baumarten zunächst die 60er, 80er und 120er Körnung verwendet. Da die Jahrringgrenzen der zerstreut-poorigen Buchen deutlich schwieriger zu erkennen sind, wurden deren Scheiben zusätzlich mit der 240er Körnung bearbeitet. Jede Scheibe wurde dann mittels halbautomatischer Bildanalyse mit dem an der Professur für Waldwachstum entwickelten Programm „Woodscan“ vermessen. Mit dem Programm werden zwei gegenüberliegende Radien der pneumatisch eingespannten Scheiben automatisch abfotografiert. Anschließend erfolgt die Darstellung der abfotografierten Radien in einem Programmfenster, wobei die anhand der (voreingestellten) Grauwerte des Bildes deutlich zu erkennenden Jahrringgrenzen bereits vom Programm gesetzt werden. Der Benutzer hat die Möglichkeit Referenz-Radialzuwachsreihen hinzuzufügen, um dann anhand der Überlappung der Muster und dem Vergleich mit den Bildern eventuell fehlende oder zu viel gesetzte Jahrringgrenzen zu korrigieren. Bei der BHD-Scheibe wurden acht in gleichen Winkeln verteilte Radien, bei den Stammscheiben aus 5, 10, 15, 20, 25 und 30 m Höhe wurden vier Radien vermessen. Auf den zur Bestimmung des Höhenwachstums entnommenen Kronenscheiben (Jungbestände) und auf den Kronenscheiben, die im Abstand von 1 m gewonnen wurden (Altbestände), wurden lediglich zwei Radien vermessen. Nur in Fällen, in der Radialzuwachs eines Radius durch Störungen verfälscht war, beispielsweise wenn Astansätze erkennbar waren oder Rindenschäden überwältigt wurden, wurde von diesem Schema abgewichen und einzelne Radien ausgelassen.

Vor allem bei den Buchenscheiben von den trockenen Standorten erreichte das Bildanalyseverfahren aufgrund der geringen Auflösung der Bilder, aber auch aufgrund der Problematik von ausfallenden Jahrringen (vgl. NICOLINI ET AL. 2001 und GRUNDMANN ET AL. 2008) seine Grenzen. Die Buchen von diesen Standorten bilden z.T. sehr enge Jahrringe oder enthalten Dichteschwankungen die im Bildanalyseverfahren nicht als solche erkannt werden. In ihrem tangentialen Verlauf auf dem Querschnitt der gesamten Stammscheibe ausfallende Jahrringe wurden bei den beprobten vorherrschenden Bäumen nicht beobachtet. Entlang der vermessenen Radien, gab es jedoch immer wieder, und vor allem in der Nähe des Marks, „Grenzfälle“. Abbildung 8 (oben) vermittelt einen Eindruck von den aufgetretenen Schwierigkeiten. Erst eine genauere Betrachtung z.B. anhand der mittels Rasierklinge und Kreide präparierten Oberflächen unter dem in Stufen vergrößerbaren Stereomikroskop (NIKON SMZ745T), konnte hier in vielen Fällen Klarheit schaffen (vgl. hierzu Abbildung 8, unten). Auch der Vergleich der Radialzuwachskurven mit Buchenscheiben von feuchteren Standorten in der Region oder mit Stammscheiben desselben Baumes aus anderen Stammhöhen unterstützte die Detektion von den wenig deutlichen Jahrringgrenzen bei einzelnen Buchen. In einigen sehr diffizilen Fällen wurde die o.g. Oberflächenpräparation, also das Anschneiden mit der Rasierklinge, das manuelle Einpressen von Kreidepulver in die Gefäße, ggf. die Befeuchtung, durchgeführt. Anschließend wurden die Jahrringgrenzen mit einem feinen Bleistift gekennzeichnet, bevor der Radius abfotografiert wurde.

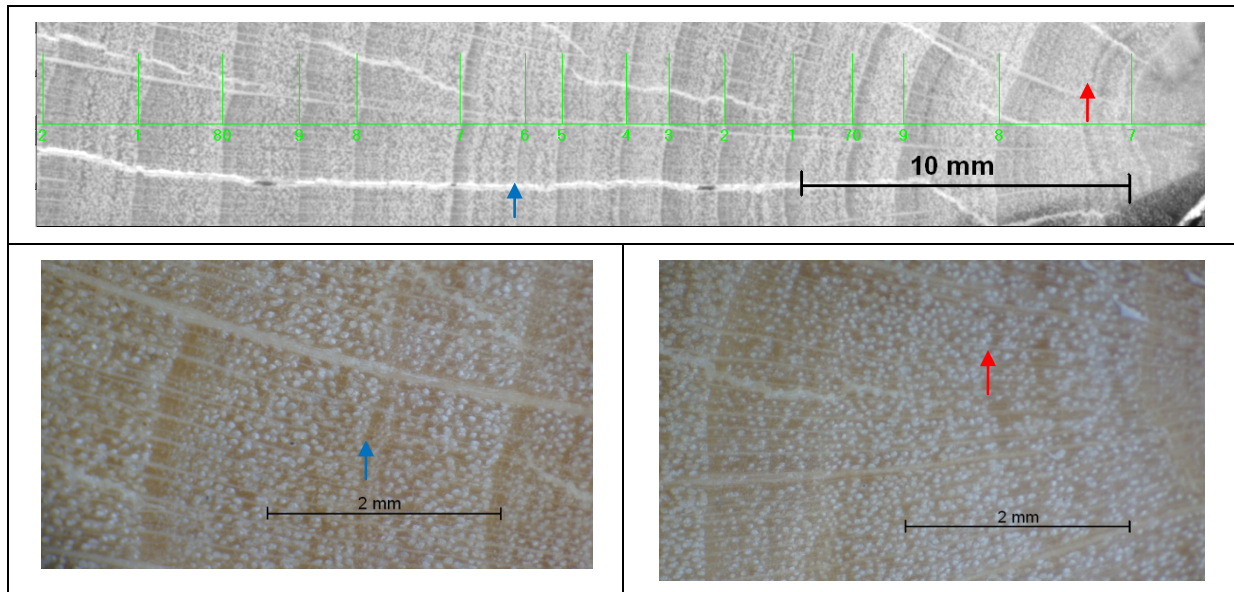


Abbildung 8: Beispiel für schwierig zu erkennende Jahringgrenzen bei Buche

Dargestellt ist die Stammscheibe aus 5 m Höhe des Untersuchungsbaums Buche Nr. 2 vom Standort Spielberg. Das obere Bild zeigt einen Ausschnitt aus dem Programm „Woodscan“ mit gesetzten Jahringgrenzen: Die Jahringgrenze 1976 (blauer Pfeil) ist im Bild kaum zu erkennen, dagegen könnte im Jahrring von 1968 (roter Pfeil) ein weiterer Jahrring vermutet werden. Unten links ist die Vergrößerung der Jahringgrenze von 1976 unter dem Stereomikroskop dargestellt: Die scharfe Grenze zwischen dem Spätholzparenchym, welches noch 1976 gebildet wurde und den großen Frühholzgefäßen im Jahr 1977 ist deutlich sichtbar. Unten rechts dagegen ist im Jahrring von 1968 in der Vergrößerung keine scharfe Grenze erkennbar, auch die Gefäßgröße verändert sich in horizontaler Richtung kaum. D.h. es handelt sich hier um keine Jahringgrenze sondern lediglich um eine Dichteschwankung innerhalb des Jahrrings. Die farblichen Veränderungen innerhalb des Jahrrings werden durch Zonen verstärkter Parenchymbildung, z.B. durch Zugholz in der Nähe des Marks, hervorgerufen. Innerhalb der Parenchymbänder sind im rechten Bild deutlich große Gefäße zu erkennen, an den echten Jahringgrenzen fehlen diese dagegen im Parenchym des Spätholzes.

3.3.2 Triebhängenermittlung um das Jahr 2003 und –korrektur anhand der Astproben

Bei allen Astproben mit den enthaltenen Triebbasisnarben der Eichen wurde die Anzahl der Jahrringe ober- und unterhalb der Triebbasisnarbe geprüft, um feststellen zu können, ob es sich um eine „echte“ oder eine „unechte“ Triebbasisnarbe handelte. Die im Feld erhobenen Triebhängen wurden bei „unechten“ Triebbasisnarben entsprechend korrigiert. Abbildung 9 zeigt die „unechte“ Triebbasisnarbe an der Eiche Nr. 1 vom Standort Sulzburg. Diese wurde offensichtlich aufgrund der Johannistriebbildung im Jahr 2008 angelegt.

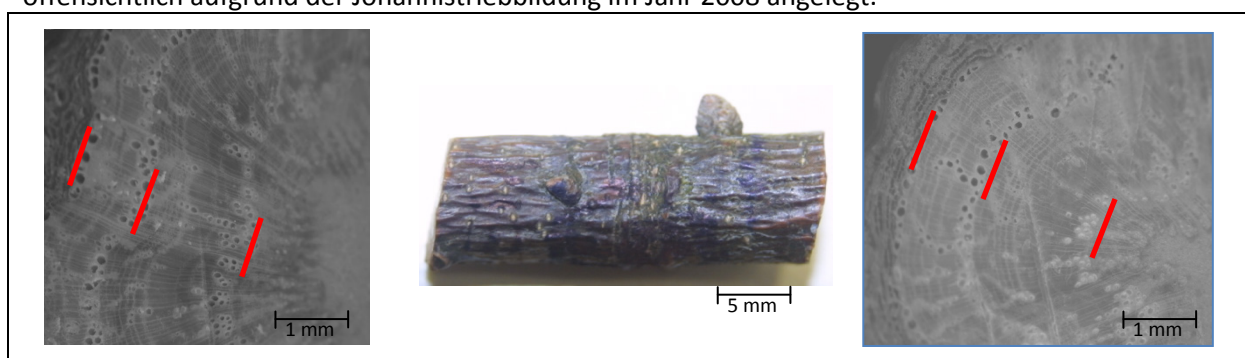


Abbildung 9: „Unechte“ Triebbasisnarbe aufgrund von Johannistriebbildung an Eiche

Links und rechts sind vergrößerte Ausschnitte von den Querschnitten der in der Mitte gezeigten Astprobe abgebildet. Die Astprobe wurde aus dem Jahrestrieb von 2008 der Eiche Nr. 1 am Standort Sulzburg entnommen.

Trotz der äußerlich sichtbaren deutlichen Narbe zeigen die Querschnitte, dass ober- und unterhalb derselben lediglich 3 Jahre (2008, 2009 und 2010) bis zum Fälldatum gebildet wurden. Es handelt sich also um die „unechte“ Triebbasisnarbe eines Johannistriebes.

Insgesamt konnten für den Zeitraum 2003 bis 2007 die jährlichen Höhenzuwächse aller Untersuchungsbäume bei den Jungbestandsbäume (n = 40) rekonstruiert werden. Für den Zeitraum 2001 bis 2002, sowie 2008 bis 2010 wurden zwischen 32 und 38 Höhenzuwächse/Jahr anhand der Triebbasisnarben rekonstruiert. Fehlende Rekonstruktionen sind auf bei der Fällung abgebrochene Wipfeltriebe oder, bei länger zurückliegenden Jahren, auf nicht mehr erkennbare Triebbasisnarben zurückzuführen.

3.3.3 Stammanalyse zur Höhenzuwachsermittlung

3.3.3.1 Rekonstruktion des Höhenwachstums im Kronenbereich

Das Höhenwachstum um 1976 wurde anhand der entnommenen Kronenscheiben berechnet. Die jährlichen Höhenzuwächse wurden über die auf den Kronenscheiben vorhandenen Jahrringe und die Abstände zwischen diesen Scheiben berechnet, wobei die Lage der sogenannten „hidden tips“, also dem Ende des Jahrestriebs im Zentrum der Kronenscheibe (vgl. hierzu KARIUKI 2002), anschließend im Zuge der Stammanalyse näherungsweise bestimmt wurden. Dabei wird bei einem Jahr Unterschied zwischen den entnommenen Scheiben die Mitte der Sektionslänge (15 cm) als Ende des Jahrestriebs festgelegt. Für den Zeitraum 1972 bis 1981 war bei den Jungbestandsbäumen im Mittel an 30 (von 40) Bäumen/Jahr das jeweilige Jahr auf einer entnommenen Kronenscheibe als innerster Jahrring vorhanden. Bei einem zusätzlichen Jahrring zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kronenscheiben wird die Hälfte des Abstandes zwischen den beiden Scheiben (15 cm, siehe Kapitel 3.2.4) als Höhenzuwachs Grenze angenommen. Für die wenigen Untersuchungsbäume, bei denen einzelne Jahre im genannten Zeitraum nicht auf einer entnommenen Kronenscheiben abgebildet waren, also ein Unterschied von mehreren Jahren zwischen den zwei aufeinanderfolgenden Kronenscheiben vorlag, wurde das jährliche Höhenwachstum interpoliert. Hierzu wurden die von CARMEAN (1972) und NEWBERRY (1991) vorgestellten Berechnungsverfahren angewandt (vgl. hierzu auch UNTHEIM 1996, 45ff.). Dieses Verfahren geht von der (idealisierten) Annahme aus, dass die Scheibenentnahme immer in der Mitte von zwei versteckten „hidden tips“ erfolgt. Bei einem Scheibenabstand von 30 cm, z.B. aus 1500 cm und 1530 cm Höhe, und 2 Jahren Jahrringdifferenz zwischen diesen beiden Scheiben, z.B. untere Scheibe mit innerstem Jahrring von 1974 und obere Scheibe mit innerstem Jahrring von 1976, wird die Sektionslänge also in $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ und $\frac{3}{4}$ aufgeteilt. Im genannten Beispiel liegt das Höhenwachstum am Ende des Jahres 1974 also bei 1507.5 cm und am Ende des Jahres 1975 bei 1522.5 cm.

Nach demselben Prinzip wurden die Höhenzuwächse zwischen den weiter auseinander liegenden Stammscheiben (1.3, 5, 10, 15, ggf. 20, ggf. 25 und ggf. 30 m) aller Untersuchungsbäume, sowie zwischen den weiter auseinander liegenden Kronenscheiben der Altbestände (i.d.R. 1 m) ermittelt.

3.3.3.2 Abgrenzung von Mark und innerstem Jahrring bei der Eiche

Bei den Eichen traten bei der Abgrenzung zwischen innerstem Jahrring und Markmeristem immer wieder Unsicherheiten auf. Kronenscheiben, die kurz unterhalb des beendeten Höhentriebs entnommen wurden, wiesen tendenziell einen sehr schmalen inneren Jahrring mit nur wenigen Gefäßen auf. Diese Gefäße waren vielfach nicht als geschlossener Ring um das Mark herum angeordnet, sondern flammenförmig in radialer Richtung nach außen aufgefächert. Für die möglichst genaue Rekonstruktion des Höhenwachstums um das Jahr 1976 war es für diese Untersuchung zwingend notwendig, genau zu erkennen, ob auf der jeweiligen Kronenscheibe bereits ein weiterer Jahrring am Mark gebildet worden war oder nicht. Abbildung 10 verdeutlicht die Zusammenhänge: Bei Scheibe C erfolgte die Entnahme knapp unterhalb des „hidden tips“, weshalb der innerste Jahrring sehr schmal ausgebildet ist und die Mark-Jahrringgrenze nur schwierig zu erkennen ist.

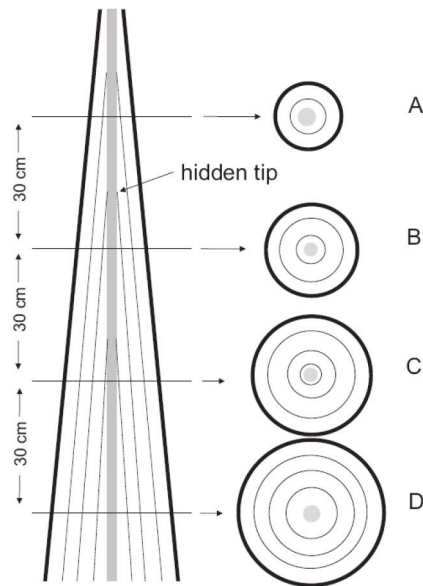


Abbildung 10: Schematische Darstellung der engmaschigen Entnahme der Kronenscheiben

Die in Abständen von 30 cm entnommenen Kronenscheiben haben aufgrund verschiedener Abstände zu den darüber liegenden „hidden tips“ unterschiedlich breite innerste Jahrringe. Bei sehr geringen Abständen (Scheibe C) ist der innerste Jahrring sehr schmal und die Abgrenzung zum Mark schwierig.

Die Eichen werden hinsichtlich des sekundären Dickenwachstums dem Tilia-Typ zugeordnet, im primären Zustand weist dieser Typ einen geschlossenen und nur von Markstrahlen durchbrochenen Leitbündelkranz auf (STRASBURGER, SITTE 1991). Typisch für die Eichen ist ein im Querschnitt sternförmiges Mark mit in der Regel fünf abgerundeten Zacken. Diese Zusammenhänge bzw. wie der innerste Jahrring in verschiedenen Höhen des Triebes aussehen kann, wurde in einer eigenen Untersuchung von GEBHART (2012) an im Freiburger Mooswald gewonnenen 3 bis 4jährigen Eichen-Pflanzen analysiert. GEBHART kommt zu dem Fazit, dass „... eine zweifelsfreie Identifikation der Mark-Jahrringgrenze in erster Linie über die Kombination von Frühholzgefäßen und gut definierten Markstrahlen möglich ist.“ (GEBHART 2012, 35). Anhand der von GEBHART aufgestellten Abgrenzungskriterien und dem von ihm erstellten Bildmaterial zum typischen holzanatomischen Aussehen der Mark-Jahrring-Grenze in definierten Höhen der Sprossachse, konnten die Abgrenzungen zwischen Mark und innerstem Jahrring auf den Kronenscheiben der Eichen eindeutig vorgenommen werden. Als Abgrenzungskriterien haben sich das Aussehen und die Verteilung der Frühholzgefäße, der Beginn der Markstrahlen im Mark und die Abgrenzung des primären Xylems der Markkrone vom sekundären Xylem des ersten Jahrrings bewährt.

3.3.4 Bodenphysikalische Analysen

Für die Aufstellung des Wasserhaushaltsmodells wurden als Eingangsparameter u.a. der Grobboden-Volumenanteil und die Trockenraumdichte des Feinbodens je Tiefenstufe benötigt. Der Grobboden kann weiter untergliedert werden in Grus mit einer Korngröße von 2 bis 63 mm und Steine mit einer Korngröße von über 63 mm (vgl. hierzu SCHEFFER ET AL. 2010, 172), sowie ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996, S.74). Die Trockenraumdichte „ist die Masse der Bodenfestsubstanz pro Volumeneinheit – mit Berücksichtigung des Bodenhohlraumsystems in natürlicher Lagerung – nach Trocknung bei 105 °C in g/cm^3 (Synonym: Rohdichte trocken (ρ_t), Substanzvolumendichte, Lagerungsdichte)“ (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996, 108).

Für die Bestimmung des Grobboden-Volumenanteils wurde die mittels Volumenersatzprobe gewonnene Bodenprobe im Labor zunächst luftgetrocknet und dann mit einem 5 mm-Sieb gesiebt. Dann wurden die Steine (> 5 mm) bei 105°C getrocknet. Anschließend wurde das Gesamtgewicht der trockenen Steine bestimmt. Mittels Wiegen und Wasserverdrängung einer repräsentativen

Steinprobe konnte die Dichte der Steine und anschließend deren Gesamtvolumen ermittelt werden. Von der gut durchmischten lufttrockenen Mittelfraktion (< 5 mm) wurde ein Aliquot von genau 1 kg entnommen. Dieses wurde im 2 mm-Sieb gesiebt und die Gewichtsanteile von Feinboden (< 2 mm) und Feingrus (2 – 5 mm) bestimmt. Anschließend wurden Feinboden und -grus bei 105°C getrocknet. Das Volumen des Feingruses im Aliquot konnte dann mit der zuvor ermittelten Steindichte berechnet und anhand der ermittelten Gewichtsanteile unter Berücksichtigung des Trocknungsverlustes auch für die Gesamtprobe ermittelt werden. Volumen des Feingruses und Volumen der Steine ergeben zusammen das Grobbodenvolumen, bzw. in Bezug zum gesamten entnommenen Volumen den Grobboden-Volumenanteil. Der Gewichtsanteil des Feinbodens (< 2 mm) der Gesamtprobe konnte dann, ebenfalls unter Berücksichtigung des Anteils und des Trocknungsverlustes im Aliquot, berechnet werden. Der Gewichtsanteil des Feinbodens (< 2 mm) der Gesamtprobe dividiert durch dessen relatives Volumen, berechnet über das Gesamtvolumen abzüglich Grobbodenvolumen, ergibt die Trockenraumdichte des Feinbodens.

Die einzelnen Arbeits- und Berechnungsschritte zur Bestimmung von Grobboden-Anteil und Trockenraumdichte können im Anhang 3 nachvollzogen werden. Außerdem ist im Anhang 4 das entsprechende Berechnungsformular beispielhaft für den Standort Sulzburg dargestellt.

3.3.5 Bodenchemische Analysen

Die boden-chemischen Analysen wurden im Labor der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Boden und Umwelt durchgeführt. Hierfür wurde aus dem absolut trockenen Feinboden der Tiefenstufe 0 – 20 cm eine Probe von ca. 100 Gramm entnommen. Im Einzelnen bestimmt wurden:

- Bodenacidität: pH-Wert, gemessen in reinem Wasser und in einer Kaliumchlorid-Suspension
- Kohlenstoff- und Stickstoffanteil in g/kg und daraus resultierend das C/N-Verhältnis
- Versorgung mit den wichtigsten Bodennährelementen in $\mu\text{mol/g}$, d.h. an basische Kationen: Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium, Mangan und an saure Kationen: Aluminium, Eisen, Wasserstoff. Daraus abgeleitet wird die Basensättigung und Kationenaustauschkapazität des Bodens.

3.3.6 Genetische Analysen

Die genetischen Analysen des Kambialgewebes der Eichen wurden im molekulargenetischen Labor der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Abteilung Waldnaturschutz durchgeführt. Ziel dabei war es anhand der Kern-DNA die genetische Diversität und Artdifferenzierung zu ermitteln und anhand der Chloroplasten-DNA Aussagen zum eiszeitlichen Refugium der Untersuchungsbäume (vgl. Kapitel 2.1.1) machen zu können. Die hierfür notwendigen Labor- und Auswertungsmethoden, d.h. die DNA-Extraktion, Polymerase-Kettenreaktion zur DNA-Vervielfältigung und Kapillarelektrophorese, sind bei NEOPHYTOU (2012) und NEOPHYTOU UND MICHIELS (2013) beschrieben.

3.3.7 Eingangsparemeter des Bodenwasserhaushaltsmodells

Es ist davon auszugehen, dass die Speicherkapazität des Bodens und dessen hydrologische Eigenschaften, also v.a. die Kohäsion- und Adhäsionskräfte, die für das Wachstum der Bäume zur Verfügung stehende Wassermenge gerade in Trockenjahren erheblich beeinflussen. Aus diesem Grunde wurde mit dem prozessbasierten Bodenwasserhaushaltsmodell LWF-BROOK-90 (HAMMEL, KENNEL 2001) die Bodenwasserverfügbarkeit für die Untersuchungsstandorte retrospektiv simuliert.

Folgende Eingangsparameter und Modellierungsansätze wurden dabei berücksichtigt:

Boden

Als Bodentiefe wurde an den Untersuchungsstandorten im Schwarzwald von einheitlich 3 m, im Stromberg aufgrund der geringeren Durchwurzelungstiefe von 2 m ausgegangen. Die im Labor bestimmten Grobboden-Volumenanteile und Trockenrohdichten lagen für 20 cm-Tiefenstufen (0-20, 20-40, 40-60 cm) vor (siehe Kapitel 3.2.6 und Anhang 4); sie wurden an die im Feld erhobenen genetischen Bodenhorizonte angepasst und flossen in den Tiefen der genetischen Bodenhorizonte in die Modellierung ein. Die unterschiedliche Porosität der Steine, d.h. Gneis im Schwarzwald und Sandsteine im Stromberg, und deren unterschiedliches Wasserspeichervermögen wurden nicht berücksichtigt – es wird von einem geringen Einfluss auf die Ausgangsparameter ausgegangen. Die im Feld bestimmte Bodenart für die genetischen Bodenhorizonte konnte direkt in das Modell übernommen werden. Der Anteil an organischem Kohlenstoff (C_{org}) wurde aus den bodenchemischen Analysedaten (siehe Kapitel 3.3.4) übernommen. Da dieser Wert aus einer Mischprobe der Tiefenstufe 0 bis 20 cm resultierte, wurde er im Modell für eine Tiefe von 10 cm angenommen und linear zunehmend bis zum Oh-Horizont, bzw. linear abnehmend bis zum Wert 0 bei der Tiefe von 60 cm extrapoliert. Die Retentionskurve und die ungesättigte hydrologische Leitfähigkeit wurde nach dem Modell nach MUALEM (1976) und VAN GENUCHTEN (1980) für die genetischen Mineralbodenhorizonte über die Pedotransferfunktionen (PTF) von PUHLMANN UND VON WILPERT (2011) geschätzt. Die PTF von PUHLMANN UND VON WILPERT schätzt aufgrund von Sand-, Schluff- und Tonanteilen, der Trockenrohdichte, dem Grobbodenanteil und dem Gehalt an organischem Kohlenstoff die hydraulischen Bodeneigenschaften bzw. die Retentionskurve. Aus der Retentionskurve wiederum können die Feldkapazität und die nutzbare Feldkapazität ermittelt werden. Für die Auflagehorizonte wurde die PTF von WÖSTEN ET AL. (1999) verwendet.

Die Retentionskurve stellt die Beziehung zwischen Wassergehalt [in Volumenprozent] und den logarithmierten Werten des Matrixpotenzials [in hPa] dar (SCHEFFER ET AL. 2010, 226). Sie hat für jede Bodenart und damit jeden Bodenhorizont eine unterschiedliche Form und ist von vielen weiteren Faktoren abhängig, z.B. von der Trockenrohdichte, dem Gehalt an organischem Kohlenstoff, der Aggregation des Bodengefüges, dem Carbonatgehalt, etc.. Abbildung 11 stellt den typischen Verlauf von Retentionskurven für einen Sand-, Schluff- oder Tonboden dar. Der auf der x-Achse dargestellte logarithmierte Wert des Matrixpotenzials entspricht dem sogenannten pF-Wert, weshalb diese Kurve auch pF-Kurve genannt wird. Der pF-Wert von 4.2 (-15.848 hPa) ist als permanenter Welkepunkt definiert, bis zu diesem Punkt wird davon ausgegangen, dass Pflanzen Wasser aus der Bodenmatrix aufnehmen können. Das unter diesem Wert gebundene Wasser ist so stark an die Bodenmatrix gebunden, dass es nicht für Pflanzen verfügbar ist. Zwischen dem pF-Wert von 1.8 (-60 hPa) und dem pF-Wert von 4.2 liegt demnach die nutzbare Feldkapazität oder nutzbare Wasserspeicherkapazität, zwischen dem pF-Wert von 1.8 und dem pF-Wert von 7 die Feldkapazität eines Bodens (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996, 113; SCHEFFER ET AL. 2010, 226).

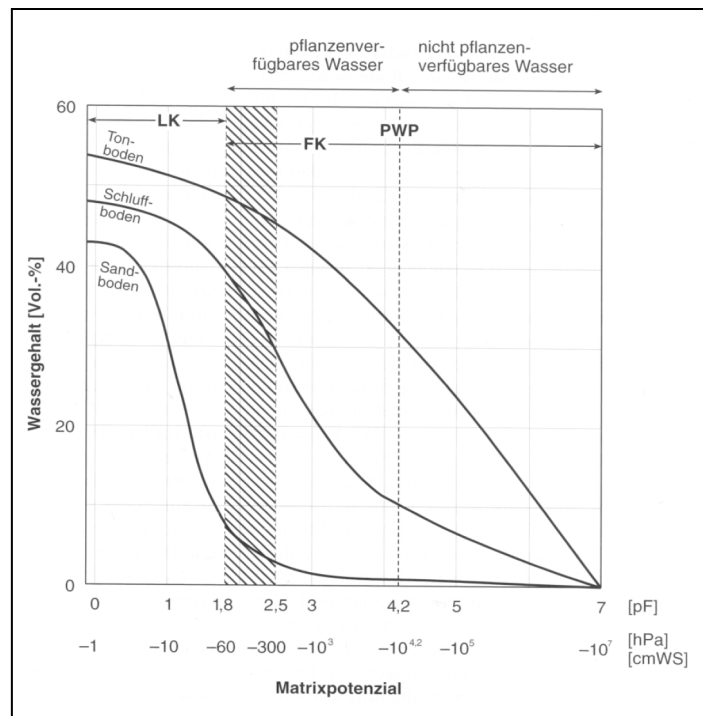


Abbildung 11: Retentions- oder pF-Kurven für drei verschiedene Bodenarten

Quelle: (SCHEFFER ET AL. 2010, 228)

Die Retentionskurven stellen die Beziehung zwischen Matrixpotenzial auf der x-Achse und Wassergehalt auf der y-Achse für Ton-, Schluff- und Sandböden dar. Zwischen Matrixpotenzial- oder pF-Werten von 1,8 und 4,2 können Pflanzen Wasser aufnehmen. Dieser Bereich stellt die nutzbare Feldkapazität (nFK) dar. Der pF-Wert von 4,2 entspricht dem permanenten Welkepunkt (PWP).

Witterung

Im Rahmen des Kooperationsprojekts SAGA-REKLIM (Klimawandel und Waldwirtschaft – Entwicklung eines Methoden- und Modellframeworks zur problemorientierten SAGA-GIS basierten Regionalisierung von Klimaparametern) wurden in Zusammenarbeit von FVA und dem Institut für Geographie der Universität Hamburg tägliche Witterungsdaten für den Zeitraum 1971 bis 2010 für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg im Raster 50 x 50 m mit dem geostatistischen Verfahren der „Geographically weighted regression“ rekonstruiert (BÖHNER ET AL. 2009; BÖHNER, ANTONIC 2009). Aus diesem Datensatz wurden die Angaben zur Niederschlagssumme, Globalstrahlungssumme, minimalen, maximalen und mittleren Tagestemperatur und zum Dampfdruckdefizit der Luft jeweils pro Tag für die Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells genutzt. Die Extraktion der Witterungsdaten aus dem Datensatz erfolgte mittels der geographischen Koordinaten der drei Bodenprofile pro Standort (Rechts- und Hochwert in Gauß-Krüger-Koordinaten). Im Modell werden zusätzlich Geländehöhe, Exposition und Hangneigung berücksichtigt, diese wurden aus einem hinterlegten digitalen Geländemodell (DGM 50) abgegriffen. Um Unschärfen im digitalen Geländemodell abzufangen, wurden zwar die Witterungsdaten an den Bodenprofilen extrahiert, letztlich in der Modellkalkulation aber mit lediglich einem pro Tag gemittelten Eingangswert gerechnet.

Bestand:

Für jedes Bodenprofil im Untersuchungsbestand wurde eine Simulation für Buche und eine für Eiche gerechnet. Pro Bodenprofil floss neben den spezifischen Bodenparametern das im Laufe der Modellierung kontinuierlich zunehmende mittlere Baumalter, die ebenfalls zunehmende mittlere Höhe und der mittlere Bestockungsgrad, resultierend aus den Messungen an den fünf Untersuchungsbäumen für die beiden Baumarten, in das Modell ein. Für die Jungbestände, die aktuell einen Bestockungsgrad von zirka 1,0 haben, wurde davon ausgegangen, dass dieser Bestockungsgrad seit 1971 existiert hat. Für die Altbestände wurde davon ausgegangen, dass der

heutige Bestockungsgrad in zwei Schritten erreicht wurde, d.h. eine Absenkung von 1,0 um die halbe Differenz zum heutigen Bestockungsgrad im Jahr 1993 erfolgte und eine Absenkung auf den heutigen Bestockungsgrad im Jahr 2002. Für die Kalkulation der Interzeption und der Transpiration benötigt LWF-BROOK-90 Angaben zum Blattflächenindex. Bezüglich der langfristigen Entwicklung des Blattflächenindex ist der Ansatz von HAMMEL UND KENNEL (2001) implementiert, der für Buche und Eiche auf Daten von MITSCHERLICH (1970) und BURGER (1939) zurückgeht. Der jährliche Verlauf des Blattflächenindex wird hinsichtlich des Blattaustriebs über ein von MENZEL (1997) aufgestelltes Modell, welches die Anzahl der Kältetage und die Wärmesumme berücksichtigt, gesteuert. Zum Laubfall wird auf den Ansatz von VON WILPERT (1990) zurückgegriffen, der ursprünglich für das Xylem-Wachstum von Fichten entwickelt wurde und davon ausgeht, dass dieses zum Erliegen kommt, wenn an fünf aufeinanderfolgenden Tagen die Temperaturen unter 10°C liegen. Des Weiteren wird die Wurzelverteilung im Modell verwendet. Die Daten hierzu wurden an den Bodenprofilen erhoben. Da für die Wasserversorgung in Trockenzeiten speziell die Durchwurzelung der tieferen Bodenschichten entscheidend ist, die Bodenprofile aber nur bis zu einer Tiefe von 60 cm gegraben werden konnten, musste die Durchwurzelung in tieferen Schichten geschätzt werden. Für die Standorte im Schwarzwald wurden die mittleren Durchwurzelungsdichten der untersten Tiefenstufe (55 - 65 cm) linear bis zu einer Bodentiefe von 3 m auf den Wert 0 interpoliert. Im Stromberg, wo in geringeren Bodentiefen bereits mit kaum durchwurzelten Mergeltonen zu rechnen ist, wurden die mittleren Durchwurzelungsdichten der untersten Tiefenstufe linear bis zu einer Tiefe von 2 m interpoliert.

3.3.8 Ausgangsparameter des Bodenwasserhaushaltsmodells und abgeleitete Kennzahlen zur Definition von Trockenstress

Als Parameter für die Wasserversorgung eines Standorts wurden mit BROOK-90-LWF für den Zeitraum 1971 bis 2010 das Matrixpotenzial (ψ) und der volumetrische Wassergehalt (θ) für die obersten 60 cm Bodentiefe in täglicher Auflösung berechnet. Anhand der eingegebenen Bestockungs- und Witterungsdaten wird in gleicher Auflösung die potentielle Transpiration [in mm] und die aktuelle Evapotranspiration [in mm] ermittelt. Das Matrixpotenzial hat per Definition ein negatives Vorzeichen und wird in Hektopascal (hPa) angegeben. Es bezeichnet den Druck den die Pflanzen aufbringen müssen, um das Wasser aus der Bodenmatrix zu extrahieren. Der Wassergehalt wird in Millimetern [mm] angegeben und ist ein Maß für den Volumenanteil des Wassers, das im Boden vorhanden ist. Bezugsgröße ist dabei das Trockenvolumen des bei 105°C getrockneten Bodens. Der Wassergehalt berücksichtigt also im Gegensatz zum Matrixpotenzial nicht die tatsächlich für das Pflanzenwachstum entscheidende Größe, nämlich den Energieaufwand, den die Bäume leisten müssen, um sich die Wasserressourcen in der Bodenmatrix zu erschließen. Zu beachten ist auch, dass es sich bei beiden Größen um modellierte Mittelwerte über die gesamte Profiltiefe von 60 cm handelt. In der Realität wird bei Trockenereignissen natürlich ein Gradient mit weniger stark negativen Matrixpotenzialen im Unterboden im Vergleich zum Oberboden und höheren Wassergehalten im Unterboden im Vergleich zum schneller austrocknenden Oberboden vorhanden sein.

Anhand der aufgestellten pF-Kurven können für jeden genetischen Bodenhorizont die Werte für Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und der permanenten Welkepunkt berechnet werden. Die Aufsummierung dieser Werte für die jeweils obersten 60 cm ermöglicht einen Vergleich der Profile.

Bezüglich der Definition von Trockenperioden bzw. Trockenstress für das Pflanzenwachstum werden in der Literatur sehr unterschiedliche Ansätze gewählt. So geht die Definition einer Trockenperiode laut dem ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996, 120) davon aus, dass das real nutzbare Bodenwasserangebot während der Vegetationsperiode den Wert der halben nutzbaren Wasserspeicherkapazität (Syn.: nutzbare Feldkapazität) an dem Standort unterschreitet. BREDÁ UND GRANIER (1996) stellen bei ihren physiologischen Untersuchungen an Traubeneichen bei Nancy fest, dass das Verhältnis zwischen der gemessenen Transpiration und der berechneten potenziellen Evapotranspiration deutlich absinkt, sobald die Werte für das „relative pflanzenverfügbare Wasser“ (relative extractable water, REW) unter 0.4 sinken. Als REW-Wert wird dabei definiert als:

$$REW = \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \quad [\text{Formel 1}]$$

R ist dabei der täglich mittels Neutronensonde gemessene Wert des Bodenwassergehalts, R_{\min} der niedrigste und R_{\max} der höchste Wassergehalt, der im Verlauf der fünfjährigen Messkampagne gemessen wurde. Wenn man davon ausgeht, dass im Beobachtungszeitraum (1989-1993) extreme Trockenperioden aufgetreten sind, entspricht R_{\min} dem permanenten Welkepunkt und die Differenz $R_{\max}-R_{\min}$ der nutzbaren Feldkapazität. Damit ließe sich die Formel auch wie folgt darstellen:

$$REW = \frac{\theta - pWP}{nFK} \quad [\text{Formel 2}]$$

Der volumetrische Wassergehalt (θ) ist ein Ausgabeparameter aus der Simulation mit LWF-BROOK-90, permanenter Welkepunkt (PWP) und nutzbare Feldkapazität (nFK) sind Größen, die über die aufgestellten pF-Kurven für jedes angelegte Bodenprofil ermittelt werden können. Ein Vorteil des REW-Wertes ist, dass in diesen die profil- bzw. standortsspezifische Wasserspeicherkapazität einfließt, d.h. Niveauunterschiede aufgrund verschieden hoher Bodenwasserspeicherkapazitäten an den Untersuchungsstandorten werden berücksichtigt.

Als pro Monat integrierter REW-Wert (REW_{int}) werden die aufsummierten Werte der täglichen REW-Werte unterhalb der von BREDÁ UND GRANIER definierten Grenze verstanden.

3.4 Statistische Methoden

Alle statistischen Berechnungen, bis auf die unter Kap. 3.4.1 genannten, sowie die entsprechenden Grafiken in dieser Arbeit wurden mit dem Freeware-Statistik-Programm R, Version: 2.15.3 (R CORE TEAM 2013) durchgeführt.

3.4.1 Statistische Methoden zur Analyse der Genetik

Die statistischen Analysen zur Genetik der Traubeneichen wurden nicht vom Autor dieser Arbeit, sondern an der Forstlichen Versuchsanstalt Freiburg von C. NEOPHYTOU durchgeführt. Deshalb erfolgt an dieser Stelle lediglich eine kurze Zusammenfassung der durchgeführten statistischen Analysen.

Zur Bestimmung der Artzugehörigkeit basierend auf den Kern-DNA-Mikrosatelliten wurde eine bayesische Cluster-Analyse mit Hilfe des Programms BAPS (Bayesian Analysis of Population Structure, Version 5.2) (CORANDER, MARTTINEN 2006) durchgeführt. Hierbei werden die Individuen aufgrund ihrer Genotypen verschiedenen Gruppen zugeordnet, die den drei in der Region heimischen Eichenarten entsprechen. Die Wahrscheinlichkeiten, mit denen bestimmte Merkmalsausprägungen an den 21 analysierten Genorten, d.h. den Sequenzen der Kern-DNA, auftreten, dienen dabei als Kriterium der Artzuordnung. Da außerdem die geografische Lage der Individuen bekannt war, wurde die Option der „räumlichen Mischungsanalyse der Individuen“ (spatial mixture analysis of individuals) ausgewählt (CORANDER, SIRÉN ET AL. 2008; CORANDER, MARTTINEN ET AL. 2008). Insgesamt hat sich diese Methodenkombination im Fall der drei heimischen Eichen als zuverlässig bei der Artbestimmung erwiesen (NEOPHYTOU 2014).

Zur Bestimmung der Bestandesherkunft wurden Chloroplasten-DNA-Mikrosatelliten analysiert. Da die Chloroplasten-DNA (cpDNA) mütterlich vererbt ist, hängt ihre Variation nur von der Samenausbreitung ab. Außerdem weist die cpDNA keine Rekombination auf, d.h. die Haplonten der cpDNA bleiben über mehrere Generationen hinweg unverändert. Deshalb spiegelt die aktuelle Verbreitung der Chloroplasten-DNA in den Eichen die historischen Migrationsereignisse wider. In Europa trennen sich die verschiedenen cpDNA-Haplotypen nach refugialer Herkunft, da in jedem Refugium nur bestimmte Gruppen von verwandten Haplotypen vorhanden waren. Die heutige räumliche Verteilung der cpDNA-Haplotypen spiegelt deshalb größtenteils die nacheiszeitliche Rückwanderung der Eichen wider. Um die ermittelten cpDNA-Haplotypen solchen refugialen

Herkünften zuzuordnen, wurden Referenzproben bekannter refugialer Herkunft verwendet (Details in NEOPHYTOU UND MICHIELS 2013).

3.4.2 Statistische Methoden zur Analyse des Höhenwachstums

Zur Verdeutlichung der Höhenwachstumstrends wurden die Wachstumskurven der Untersuchungsbäume aus den Jungbeständen zunächst einzelbaumweise mit der Trendfunktion von SLOBODA (1971) modelliert.

$$y_t = 65^\gamma * \left(\frac{H_t}{65^\gamma} \right) \exp \left(\frac{\beta}{(\alpha-1) * t^{(\alpha-1)}} \right) - \left(\frac{\beta}{(\alpha-1) * t^{(\alpha-1)}} \right) \quad [\text{Formel 3}]$$

In diesem Modell wird die Entwicklung der Höhe (y_t) eines Baumes entlang einer jährlichen Zeitachse (t) anhand eines Einhängepunktes bestimmt. Als Einhängepunkt wird die Höhe (H_t) zu einem bestimmten Bezugsalter (Alter in Jahren, A_t), und damit die Höhenbonität, herangezogen. ALBRECHT ET AL. (2012) haben anhand baden-württembergischer Versuchsflächendaten das Sloboda-Modell bereits für verschiedene Baumarten parametrisiert. Die auf diese Weise für Buche und Traubeneiche ermittelten Modellkoeffizienten ergaben für die Untersuchungsbäume der vorliegenden Studie jedoch eine unzureichende Anpassung, weshalb für die Untersuchungsbäume die Trendfunktion einzelbaumweise mittels nicht-linearer Regression angepasst wurde (Funktion `nls()` in R). Um die Modelle an möglichst lange Datenreihen anzupassen, wurde als Einhängepunkt jeweils das in Stockhöhe ermittelte) Alter zum Einschlagszeitpunkt des Baumes und die in diesem Alter erreichte Höhe genutzt.

Die einzelbaumweise modellierte Kurve stellt den geglätteten Höhenwachstumsverlauf dar und kann als „normale“ Höhenwachstumskurve bezeichnet werden. Abweichungen zwischen dem modellierten und dem tatsächlichen Höhenwachstumsverlauf sind auf Störungen zurückzuführen und können mit dem Quotient H_{Index} dargestellt werden.

$$H_{\text{Index}} = \frac{H_t}{y_t} \quad [\text{Formel 4}]$$

H_t steht hier für die beobachtete Höhe zum Zeitpunkt t , y_t für die modellierte Höhe.

Höhenzuwachsdifferenzen zwischen den Baumarten wurden mit dem paarweisen t-Test (Paardifferenztest) auf Signifikanz geprüft. Zum Test der Abweichung des mittleren Höhenwachstumsquotienten H_{Index} von 1,0 wurde ein Einstichproben-t-Test durchgeführt.

3.4.3 Statistische Methoden zur Analyse des Radialzuwachses

3.4.3.1 Dendrochronologische Kennzahlen

Die Auswertungen der dendrochronologischen Kennzahlen wurden mit dem R-package „dplR“ (BUNN 2008), ergänzt durch stichprobenartige selbst programmierte Kontrollberechnungen, durchgeführt. Es wurden dabei die Radialzuwachs-, bzw. Indexserien (vgl. folgendes Kapitel zur Trendbereinigung) der Einzelbäume, begrenzt auf den gemeinsamen Überlappungszeitraum aller Bäume, d.h. die Jahre 1962 bis 2010 analysiert. Zur Berechnung und Interpretation der dendrochronologischen Kennzahlen existiert eine Vielzahl an Fachliteratur (z.B. COOK, KAIRIUKSTIS 1990; FRITTS 2001; RIEMER 1994; SCHWEINGRUBER 1993). Eine umfassende Erläuterung der statistischen Hintergründe und Zusammenhänge würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb beschränkt sich die folgende Auflistung auf die wichtigsten hier verwendeten Kennzahlen, erläutert kurz deren mathematische Herleitung und deren Aussagekraft.

Autokorrelation (AK1): Generell versteht man unter der Korrelation ein Ähnlichkeitsmaß, welches durch den Korrelationskoeffizienten (r^2) ausgedrückt wird. Der Korrelationskoeffizient schwankt zwischen 1 und -1, wobei 0 keine Ähnlichkeit zwischen z.B. zwei Zeitreihen, 1 eine vollständige

Identität und -1 eine vollständige Unterschiedlichkeit bedeutet. Zur Berechnung der Autokorrelation wird eine Zeitreihe mit der derselben Zeitreihe, die aber um z.B. ein Jahr verschoben wird (=lag 1), verglichen. Hohe, d.h. nahe bei 1, liegende Werte bedeuten also, dass der Zuwachs in einem Jahr stark vom Zuwachs des vergangenen Jahres beeinflusst wird. Auf Jahre mit hohen Zuwächsen folgen also Jahre mit ebenfalls hohen Zuwächsen und umgekehrt. Die Radialzuwachskurve hat deshalb in der Regel geringe Ausschläge von Jahr zu Jahr. RIEMER (1994, 73) definiert den Begriff der Autokorrelation folgendermaßen: „Autokorrelation ... ist die Korrelation ... zwischen jeweils zwei unmittelbar aufeinanderfolgenden Werten. ... Eine hohe positive Autokorrelation (AK) bedeutet, daß auf hohe Werte der Zeitreihe im Mittel wiederum hohe folgen und umgekehrt. Bei niedriger, negativer AK wechseln sich eher Zeitpunkte mit großen und kleinen Werten ab.“

Die Autokorrelation einer Zeitreihe kann mit dem Durbin-Watson-Test überprüft werden. Dieser Test wurde ursprünglich für die Analyse der Residuen von Regressionsmodellen entwickelt, kann aber auch für die Analyse von Zeitreihen verwendet werden (TEETOR, LOUKIDES 2011). Für die Bewertung der Autokorrelation in den Absolutwerten der Radialzuwachsserien und in den trendbereinigten Indexserien wurde der Durbin-Watson-Test für den gemeinsamen Überlappungszeitraum 1962-2010 durchgeführt. Dabei wurde die Funktion `dwtest` aus dem package „lmtest“ mit der Option „two.sided“ verwendet (ZEILEIS, HOTHORN 2002).

Sensitivität (SENS): Mit der *jährlichen* Sensitivität wird zunächst die Veränderung in Prozent zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren, bezogen auf den Mittelwert der beiden Jahrringbreiten beschrieben. Oder in den Worten von RIEMER (1994, 73): „Sensitivität [ist] ... die durchschnittliche absolute Differenz zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Reihenwerten, bezogen auf deren Mittelwert. ... Geht man davon aus, dass interne Wachstumsfaktoren eines Baumes keine großen jährlichen Schwankungen aufweisen, ist hohe Sensitivität einer Jahrringserie ein Anzeichen für eine starke Abhängigkeit des Baumes von schwankenden Umwelteinflüssen.“

Die *mittlere* Sensitivität einer Zeitreihe ist dann der arithmetische Mittelwert dieser jährlichen Sensitivität. Diese Kennzahl wurde bereits 1920 von Douglass (BIONDI, QEADAN 2008, 1056) eingeführt, um die jährliche Variabilität einer Zeitreihe von Jahrringbreiten zu charakterisieren. Radialzuwachsserien mit hoher Sensitivität haben deshalb starke Schwankungen von Jahr zu Jahr, die Kurve weist deshalb i.d.R. starke Ausschläge auf. Man spricht auch von sensitiven Kurven, im Gegensatz zu *complacent* (trägen) Kurven. Damit die mittlere Sensitivität nicht zusätzlich von Trends in den Jahrringserien beeinflusst ist, wird sie üblicherweise für die trendbereinigten Indexwerte berechnet. Theoretisch kann der Wert für die mittlere Sensitivität zwischen 0, dann sind alle Jahrringbreiten genau gleich breit, und 2 schwanken. Im letztgenannten Fall ist jeder zweite Jahrring ein ausfallender Jahrring. Tatsächlich liegen die Werte jedoch zwischen 0.1 und 0.6, z.B. bei FRITTS UND SHATZ (1975) für einen Datensatz mit 102 Jahrring-Chronologien von drei Nadelholzarten (*Pinus edulis*, *Pinus ponderosa* und *Pseudotsuga menziesii*), der sich über den ganzen Westen der USA erstreckt.

Aus statistischer Sicht wird die Kennzahl „mittlere Sensitivität“ immer wieder kritisiert, da sie nur unmittelbar benachbarte Werte miteinander vergleicht, die Bezugsgröße, d.h. das Mittel der beiden benachbarten Jahrringbreiten relativ willkürlich gewählt sei und sie keine zusätzlichen Informationen im Vergleich zur Standardabweichung und der Autokorrelation enthalte (BUNN ET AL. 2013; STRACKEE, JANSMA 1992). BIONDI UND QEADAN (2008) schlagen als Alternative den sogenannten „Gini-Koeffizienten“ als dendrochronologische Kennzahl vor, um die gesamte Heterogenität einer Jahrringserie zu beschreiben. Der Gini-Koeffizient (G) ist die Summe aller Differenzen zwischen allen Beobachtungspaaren, also z.B. den Jahrringbreiten eines Baumes, geteilt durch das Produkt aus der Anzahl der Beobachtungen (n) und Mittelwert (\bar{x} , mittlerer Jahrringbreite). Der Gini-Koeffizient wurde für das vorhandene Untersuchungsmaterial berechnet.

Da die Ergebnisse sich jedoch weitestgehend mit der Sensitivität deckten, wird auf dessen Darstellung verzichtet.

Interserienkorrelation (ISK): Die mittlere Interserienkorrelation gibt die Ähnlichkeit zwischen allen Untersuchungsbäumen eines Bestandes oder Standorts an. In Form einer Matrix kann der Korrelationskoeffizient zwischen allen möglichen Baumpaaren dargestellt werden. Im Falle der vorliegenden Untersuchungen sind dies pro Standort-Baumart-Kombination (fünf Untersuchungsbäume) zehn Zeitreihenvergleiche, d.h. die mittlere ISK gibt den arithmetischen Mittelwert aus den zehn berechneten Korrelationskoeffizienten an.

Expressed Population Signal (EPS): Das „Expressed Population Signal“ ist eine Größe die von WIGLEY ET AL (1984) eingeführt wurde. Sie beinhaltet eine Aussage dazu, wie gut die mittlere Jahrringchronologie einer Untersuchungseinheit, z.B. von ausgewählten Bäumen eines Bestandes, die (theoretische) mittlere Jahrringchronologie der gesamten Population, z.B. von allen Bäumen des Bestandes, wiedergibt. Ein Schwellenwert von 0.85 wird von WIGLEY ET AL. (1984, 208) als Limit angesehen, um treffsichere Klima-Wachstumsanalysen durchführen zu können. Die Berechnung des EPS basiert auf den Korrelationskoeffizienten zwischen den Jahrringserien der untersuchten Bäume, und der Anzahl der analysierten Bäume (BRIFFA, JONES 1990).

Die genannten Kennzahlen wurden in dieser Arbeit, wie in der Dendrochronologie üblich, auf der Grundlage der einzelbaumweise trendbereinigten Radialzuwachsseries (Indexseries, siehe folgendes Kapitel) berechnet. Um den Einfluss der Trendbereinigung speziell auf die Autokorrelation mit lag 1 und die Sensitivität darzustellen, werden in der Ergebnisdarstellung (Tabelle 5) zwei Berechnungsgrundlagen gegenübergestellt. Diese sind zum einen die Berechnung anhand der Absolutwerte der Radialzuwachsseries, und zum anderen die Berechnung anhand der trendbereinigten Radialzuwachsseries. Als „Absolutwert“ wird das quadratische Mittel der i. d. R. acht vermessenen Radien der BHD-Scheibe bezeichnet. Die durchgeführte Trendbereinigung wird im folgenden Kapitel erläutert.

3.4.3.2 Trendbereinigung

Als „Trendbereinigung“ werden in der Dendrochronologie statistische Verfahren bezeichnet, um mittel- bis langfristige Trends in den Radialzuwachsseries der Einzelbäume herauszufiltern und diese vom in den Jahrringen vorhandenen „Witterungssignal“ zu trennen. Vielfach wird dabei von einer negativen Exponentialkurve („Hockeyschläger“) ausgegangen. Diese Kurve soll dem sogenannten Alterstrend am ehesten entsprechen und stellt den idealtypischen Verlauf des Radialzuwachses von innen (Mark) nach außen (Rinde) dar. Dabei ist der Zuwachs zu Beginn hoch und nimmt dann exponentiell ab bzw. nähert sich langsam einem unteren Grenzwert. Dieses Idealbild trifft für alte und weitestgehend freistehende Bäume an Grenzstandorten, z.B. an der Baumgrenze, wie sie idealerweise für dendrochronologischen Analysen verwendet werden, oftmals zu. In der vorliegenden Analyse wurden dagegen Bäume aus geschlossenen und bewirtschafteten Beständen verwendet. Auch wenn vorherrschende Bäume für diese Untersuchung ausgewählt und eingeschlagen wurden, muss von einem Einfluss der Bestandesdichte bzw. Konkurrenzsituation und Auswirkungen von Durchforstungsmaßnahmen auf den Radialzuwachs ausgegangen werden. YUE ET AL. (2011) versuchen diese Einflüsse durch ein sogenanntes Dekompositionsmodell, in welches u.a. Alter, Bonität, Konkurrenz, Durchforstungs- und Umwelteffekt eingehen, zu quantifizieren. Allerdings ist für diesen Ansatz zur Quantifizierung der Konkurrenzeffekte z.B. die zeitliche Entwicklung der kumulativen Durchmesser- und Grundfläche notwendig. Beides war für die in dieser Untersuchung ausgewählten Bu-Ei-Mischbestände nicht vorhanden, weshalb auf andere Methoden der Trendbereinigung zurückgegriffen werden musste. Eine visuelle Analyse der Radialzuwachsseries der 80 Untersuchungsbäume (vgl. Anhang 5) zeigt, dass für die untersuchten Bäume, bis auf die vom ältesten Standort Lautenbach, kaum einen Alterstrend auszumachen ist. Dagegen sind periodische,

mittelfristige Schwankungen z. T. deutlich ausgeprägt. Um diese Art von Trends zu glätten, bietet sich aus der Vielzahl der möglichen Trendbereinigungsverfahren, ein Verfahren mit einer kubisch glättenden Ausgleichsfunktion (Spline) an. Diese Funktion wurde in der Dendrochronologie von COOK UND PETERS (1981) eingeführt und als „Tiefpassfilter“ bezeichnet. Dabei wird ein Polynom dritten Grades entlang der Zeitachse gestückelt. Es wird ein eigenes Polynom an jede Sequenz der Jahrringserie mit drei Punkten angepasst, wobei anhand bestimmter Parameter der Ausgleichskurve festgelegt wird, wie flexibel sich diese Kurve den originalen Radialzuwachswerten annähert. Die Parameter der Ausgleichsfunktion sind die Wellenlänge (Periode) und die Anzahl der berücksichtigten Jahre. RIEMER (1994, 116) benennt als zentrale Eigenschaften von „kubischen Splines“ die Güte ihrer Anpassung an die Originaldaten und ihre Glattheit, wobei die Güte der Anpassung durch die mittlere quadratische Abweichung und die Glattheit durch die mittlere absolute Krümmung quantifiziert werden. COOK UND PETERS (1981) definieren den Begriff des „n-jährigen-Spline“ als einen Spline mit einer Periode von n-Jahren, der ein Amplitudenverhältnis von 50 % hat. Ein 30-jähriger Spline bedeutet also, dass die Ausgleichsfunktion sich in einem Zeitabschnitt von 30 Jahren den Originaldaten so weit annähert, dass die Amplitude der Ausgleichsfunktion 50 % der Amplitude der Originalwerte erreicht. Im Folgenden wird der Begriff des „n-jährigen-Splines“ nach der Definition von COOK UND PETERS verwendet. Das beschriebene Verfahren der Splinefunktion hat im Gegensatz zu Verfahren mit z.B. einem linearen oder negativen exponentiellen Verlauf der Ausgleichsfunktionen den Vorteil, dass sich der Spline an Auf- und Abwärtstrends der Radialzuwachsreihen anpasst. Dieses ist gerade bei Untersuchungsbäumen, die in bewirtschafteten Beständen gewonnen werden, von Interesse. Allerdings werden, je nach Wahl der Parameter für die Ausgleichsfunktion auch Informationen über die langfristigen Wachstumsveränderungen (Wachstumstrends) aus den Originaldaten eliminiert. Die Originalwerte werden im Verfahren der Trendbereinigung durch die Werte der Ausgleichsfunktion geteilt und man erhält sogenannte „Indexwerte“ des Radialzuwachses. Durch eine Mittelwertbildung der fünf pro Standort-Baumart-Kombination vorhandenen Zeitreihen der Indexwerte wurden sogenannte „Indexserien“ gebildet. Die Indexserien sind begrifflich gleichzusetzen mit „trendbereinigten Radialzuwachsreihen“ und von den „Radialzuwachsreihen“, die auf einer Mittelwertbildung der Absolutwerte beruhen, zu unterscheiden.

Die Trendbereinigung erfolgte einzelbaumweise mit unterschiedlich steifen Splinefunktionen, d.h. 10 bis 50jährige Splines, mit dem R-Befehl `ffcsaps` (Package: `dplR`, BUNN 2008). Abbildung 12 zeigt am Beispiel des Untersuchungsbaumes Buche 1 vom Standort Lautenbach, wie sich die Trendbereinigung mit unterschiedlichen Splinefunktionen auswirkt. Es wird deutlich, dass durch die Splinefunktion, dargestellt mit der pinken Farbe auf der linken Seite in Abbildung 12, die langfristigen Schwankungen in den Radialzuwachsreihen hervorgehoben werden. Je kürzer der Zeitabschnitt für die Anpassung der Splinefunktion gewählt wird, desto stärker passt sich die Funktion an die Absolutwerte an, d.h. desto mehr werden auch die mittelfristige Schwankungen durch die Splinefunktion hervorgehoben bzw. in den trendbereinigten Werten ausgeglichen. Generell gilt: Je flexibler die Splinefunktion, desto weniger ausgeprägt sind die Zuwachseinbrüche in den Indexwerten im Vergleich zu den Originalwerten.

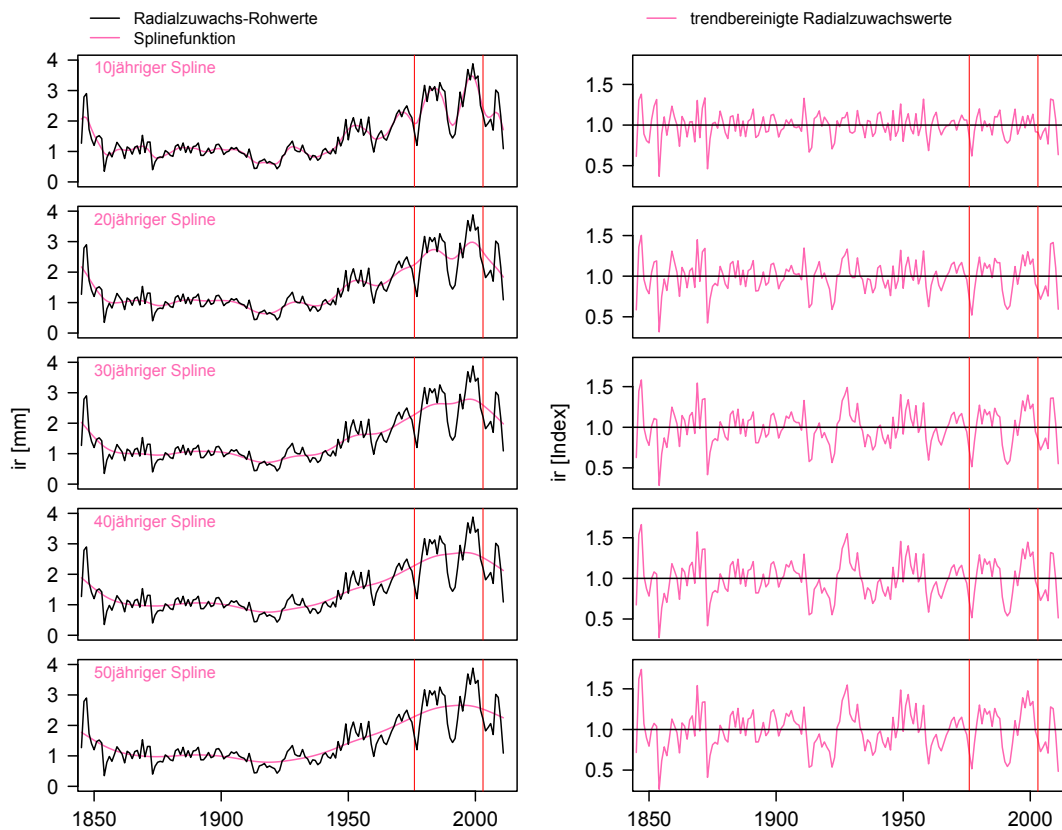


Abbildung 12: Auswirkung der Trendbereinigung mit unterschiedlichen Splinefunktionen

Am Beispiel des Untersuchungsbaumes Buche Nr. 1 vom Standort Lautenbach sind links die Absolutwerte der Radialzuwachsreihen (schwarz) mit der entsprechenden Splinefunktion (pink) dargestellt. Rechts werden in pink die entsprechenden Indexreihen gezeigt. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind mit vertikalen roten Linien gekennzeichnet.

Je flexibler die zugrunde gelegte Splinefunktion, desto geringer sind die Ausschläge in der Indexserie.

3.4.3.3 Hauptkomponentenanalyse

Die Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis = PCA) ist ein Verfahren der multivariaten Statistik und dient grundsätzlich dazu umfangreiche Datensätze zu strukturieren. Die PCA basiert auf den Korrelationen der Merkmalsausprägungen zwischen verschiedenen Gruppen. Als Merkmalsausprägungen gelten im vorliegenden Fall die trendbereinigten Radialzuwächse, als Gruppen die jeweils zwei Baumarten, Untersuchungsregionen, Altersgruppen oder Expositionen. Ziel der PCA ist es, Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Merkmalsausprägungen verschiedener Gruppen zu erkennen. Im Gegensatz zur Faktorenanalyse wird bei der Hauptkomponentenanalyse davon ausgegangen, dass die Varianz der Ausgangsvariablen „vollständig durch die Extraktion von Faktoren erklärt werden kann“ (BACKHAUS ET AL. 2011, 356). Ein Vorteil der PCA besteht darin, dass als Eingabedaten autokorrelierte Zeitreihen ausgewertet werden können. Da die Radialzuwachsreihen der Roh- und Indexwerte der untersuchten Baumarten teilweise hohe Autokorrelationswerte aufweisen (vgl. Tabelle 5), wurden Hauptkomponentenanalysen mit den Absolutwerten und unterschiedlich trendbereinigten Radialzuwachsreihen der BHD-Scheiben durchgeführt. Ziel dieser Analyse war es, herauszufinden, ob verschiedene Arten der Trendbereinigung (vgl. Kapitel 3.4.3.2) Hinweise auf mögliche Unterschiede und Gemeinsamkeiten in den Zeitreihen von Buchen und Eichen geben. Die Eigenwerte der mittleren Indexreihen wurden mit dem R-Befehl `eigen` berechnet und die Faktorladungen mit dem Befehl `prcomp` ausgewertet.

3.4.3.4 Witterungs-Wachstums-Beziehungen (Witterungs-Sensitivität)

Unter Witterungs-Wachstums-Beziehungen versteht man den statistischen Zusammenhang zwischen Witterungsdaten und verschiedenen Wachstumsgrößen. In der Dendroklimatologie wird hierfür häufig der Begriff „Klima-Wachstums-Beziehungen“ verwendet. Da auch in der Dendroklimatologie meist monatliche Witterungsdaten von Temperatur und Niederschlag mit den jährlichen Radialzuwachsserien bzw. deren Indexwerten korreliert werden, ist der Ausdruck „Klima“ in diesem Zusammenhang irreführend. Kurzfristige Charakterisierungen des Wettergeschehens, d.h. von mehreren Tagen bis hin zu den Jahreszeiten, werden mit dem Begriff „Witterung“ umschrieben. Das „Klima“ dagegen beschreibt die Zusammenfassung der Wettererscheinungen an einem bestimmten Ort anhand von Mittel- oder Extremwerten, die über einen Zeitraum von i.d.R. 30 Jahren berechnet werden (DEUTSCHER WETTERDIENST 30.05.2014). Auch in der vorliegenden Arbeit werden Korrelationen und Regressionen zwischen den Zeitreihen von monatlichen und täglichen Witterungs- und Bodenwasserhaushaltsdaten und den Radialzuwachsserien gebildet. Um die Begrifflichkeiten klar zu trennen, wird im Folgenden einheitlich der Begriff „Witterungs-Wachstums-Beziehungen“ verwendet.

Witterungs-Wachstums-Beziehungen auf der Basis von Monatswerten

Zur Charakterisierung der Witterungs-Wachstums-Beziehungen werden sogenannte „Korrelationsfunktionen“ (*correlation functions*) oder „Antwortfunktionen“ (*response functions*) verwendet (BRIFFA, COOK 1990). Die *correlation function* entspricht einer zeitlichen Sequenz von Korrelationskoeffizienten einer Pearson Produkt-Moment-Korrelation zwischen z.B. monatlichen Witterungsdaten und Jahringbreiten. Der *response function* liegt eine Regressionsanalyse zugrunde. Generell müssen für lineare Regressionsanalysen folgende Voraussetzungen gegeben sein (BACKHAUS ET AL. 2011, 85f.; FAHRMEIR ET AL. 2009, 64ff.):

- Richtige Spezifizierung des Modells, d.h. das Modell muss die relevanten erklärenden Variablen (Regressoren) enthalten, die Parameter der erklärenden Variablen müssen lineare Zusammenhänge mit der Antwortvariablen aufweisen und die Anzahl der zu schätzenden Parameter muss kleiner als die Anzahl der Beobachtungen sein.
- Der Störterm hat den Erwartungswert Null.
- Zwischen den erklärenden Variablen und der Störgröße besteht keine Korrelation.
- Die Störgrößen oder Residuen sind homoskedastisch, d.h. die Streuung der Residuen ist über den gesamten Wertebereich konstant.
- Die Störgrößen oder Residuen weisen keine Autokorrelation auf.
- Zwischen den erklärenden Variablen besteht keine Multikollinearität, d.h. eine erklärende Variable darf sich nicht als lineare Funktion der übrigen erklärenden Variablen darstellen lassen.
- Die Störgrößen oder Residuen sind normalverteilt.

Sowohl die *correlation functions* als auch die *response functions* gehen von der Annahme aus, dass die Witterungs-Wachstums-Beziehungen durch einfache lineare Modelle abgebildet werden können. Dieses wird in der klassischen Dendrochronologie dadurch sichergestellt, dass die Auswahl der Untersuchungsbäume an Extremstandorten stattfinden, an denen das Wachstum der Bäume im Wesentlichen von einem Parameter abhängt (BIONDI 1997). Wenn Untersuchungsbäume ausgewählt werden, deren Wachstum von mehreren Parametern beeinflusst (Multikollinearität) wird, sind nicht-lineare Methoden besser geeignet. Mit der Anwendung der *response functions* wird versucht das Problem der Multikollinearität dadurch zu minimieren, indem multivariate Schätzer in einem Regressionsmodell, das auf einer Hauptkomponentenanalyse basiert, berechnet werden. D.h. die multikollinear voneinander abhängigen Witterungsvariablen (=erklärende Variablen) werden zunächst entlang der Hauptkomponenten orthogonalisiert. Die Hauptkomponenten mit den geringsten Eigenwerten werden aus dem Modell gestrichen.

Anschließend wird die Signifikanz der erklärenden Variablen anhand von 1000 Bootstrapping-Fällen geprüft. Im Rahmen des Bootstrapping werden Zufallszahlen über die den Daten zugrunde liegende Verteilung gezogen. Dieses Prozedere soll die aufgrund der Multikollinearität auftretenden Schwierigkeiten minimieren. Auch in dieser Arbeit werden klassische *response functions* nach dem dargestellten Verfahren berechnet. Dabei werden die Ergebnisse der Regressionen zwischen den trendbereinigten mittleren Jahrringbreiten (Antwortvariable) und den Witterungsparametern (monatliche Niederschlagssumme und monatliche Durchschnittstemperatur) als unabhängige Variablen, verglichen mit den Ergebnissen der Regressionen zwischen den trendbereinigten mittleren Jahrringbreiten und den Parametern aus dem aufgestellten Bodenwasserhaushaltsmodell. Im ersten Fall, d.h. bei Niederschlag und Temperatur, ist dabei das Problem der Multikollinearität gegeben, im zweiten Fall, also bei den Bodenwasserhaushaltsdaten, nicht. Als unabhängige Variablen aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell (LWF-BROOK-90) werden dabei die zu Monatswerten aggregierten, täglich aufgelösten Werte des Matrixpotenzials bzw. der berechneten integrierte REW-Wert (REW_{int}) verwendet. Datenquelle für die monatlichen Witterungsparameter sind die DWD-Grid-Daten. Neben den (wahrscheinlich) multivariaten Zusammenhängen ist von den o.g. Prämissen einer linearen Regression im Rahmen von jahrringbasierten Untersuchungen vor allem das Problem der Normalverteilung und der Autokorrelation zu beachten. Die Normalverteilung ist in dieser Untersuchung sowohl für die Absolutwerte als auch für die Indexwerte gegeben. Hinsichtlich der Autokorrelation weisen z.B. FAHRMEIER ET AL. (2009) explizit auf die Autokorrelation der Residuen hin. Dabei besteht theoretisch die Möglichkeit, dass die Erhaltungsneigung (Autokorrelation) in der erklärenden Variable, z.B. den monatliche Niederschlagssummen, der Erhaltungsneigung in der Antwortvariable, also der Radialzuwachs- oder Indexserie, entspricht und damit in den Residuen keine Autokorrelation mehr vorhanden ist. In Kapitel 4.5.3 (Tabelle 5) wird gezeigt, dass die mit einem 20jährigen Spline trendbereinigten Radialzuwachswerte (der BHD-Scheibe) bereits eine weitaus geringere Autokorrelation als die Rohdaten aufweisen. Die in den Indexwerten noch vorhandene Autokorrelation könnte über ein autoregressives Modell (ARIMA-Modell, siehe VENABLES, RIPLEY 2002, 397ff.) weiter reduziert werden.

Weiter entscheidend für die Aufstellung der *response functions* ist, dass das gemeinsame Signal der fünf Bäume, d.h. die Schwankungen der Radialzuwachs- oder Indexserien, der Standort-Baumart-Kombination möglichst hoch ist. Nur dann ist gewährleistet, dass die baumindividuellen Unterschiede gering sind und die, das Wachstum beeinflussenden, gemeinsamen Faktoren der STO-BA-Kombination homogen auf alle Bäume des Standorts wirken. Baumindividuelle Unterschiede können im gleichen Bestand z.B. aufgrund der unterschiedlichen Bodenbeschaffenheit im Wurzelraum, aufgrund von unterschiedlichen Konkurrenzsituationen oder aufgrund unterschiedlicher genetischer Ausstattung der einzelnen Bäume auftreten. Das gemeinsame Signal kann durch die Interserienkorrelation ausgedrückt werden. In Kapitel 4.5.3 (Tabelle 5) wird deutlich, dass die mittlere Interserienkorrelation aller Bäume mit zunehmender Flexibilität der Splinefunktion steigt, die Unterschiede zwischen der Trendbereinigung mit 10 oder 20jährigem Spline jedoch gering sind.

Schließlich sollten aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Korrelationen zu den Tageswerten (vgl. nächster Abschnitt) dieselben Eingangsdaten verwendet werden. Für die Pearson Produkt-Moment-Korrelationen ist eine Autokorrelation in den entsprechenden Zeitreihen nur im Hinblick auf die Korrektur des effektiven Stichprobenumfangs von Bedeutung (MEKO 2013).

Aus den verschiedenen vorstehend genannten Gründen wurden die *response functions* deshalb mit den arithmetischen Mittelwerten der Indexserien der STO-BA-Kombination berechnet. Auf einen Ausgleich von Ausreißern durch die Berechnung des Mittelwert über das von TUKEY etablierte Verfahren (MOSTELLER, TUKEY 1977) des „biweight robust mean“ wurde verzichtet, da aufgrund der visuellen Analyse der Jahrringkurven kaum von Ausreißern ausgegangen werden

kann und TUKEYS Verfahren für einen geringen Stichprobenumfang, im vorliegenden Fall sind dies lediglich fünf Zeitreihen, wenig geeignet ist (COOK ET AL. 1990). Die Trendbereinigung wurde einzelbaumweise mit einem 20jährigen Spline vorgenommen.

Das Prozedere zur Berechnung der *response functions* ist im C++-Programm *Dendroclim2002* (BIONDI, WAIKUL 2004) implementiert und wurde innerhalb des Statistik-Programm R mit dem Package „bootRes“ (ZANG, BIONDI 2013) verfügbar gemacht. Um die zeitliche Stabilität und Konstanz des Witterungs-Wachstums-Signals zu überprüfen, wurden, neben den auf dem gemeinsamen Überlappungszeitraum basierenden *response functions*, zusätzlich laufende, *moving response functions* innerhalb eines Zeitfensters von 20 Jahren berechnet.

Witterungs-Wachstums-Beziehungen auf der Basis von Tageswerten

Letztlich beinhalten die auf Monatswerten, egal ob Witterungs- oder Bodenwasserdaten, basierende *correlation* oder *response functions* immer die Unsicherheit, dass die Schwankungen innerhalb eines Monats durch die Verwendung von Monatsmittelwerten oder Summen verwischt werden. So könnten z.B. geringe Niederschläge in den letzten drei Aprilwochen und den ersten drei Maiwochen zu einer sich deutlich auf den Radialzuwachs auswirkenden sechswöchigen Trockenperiode führen. Wenn allerdings in die Korrelations- oder Regressionsanalysen nur Monatswerte einfließen und es - um im Beispiel zu bleiben - in der ersten April- und letzten Maiwoche außergewöhnlich viel geregnet hätte, so dass die Mittelwerte der Monate gar keine außergewöhnlichen Ereignisse aufzeigen, kann auch die Analyse mit diesen Werten zu keinem Ergebnis führen. Dieses Problem wurde schon von vielen Autoren erkannt, BECK ET AL. (2013) gingen es durch die Entwicklung des Programms CLIMTREG systematisch an. Mit diesem Programm werden die Korrelationen zwischen Tageswerten von Witterungsvariablen, d.h. i.d.R. von Temperatur- und Niederschlagswerte, und den jährlich aufgelösten Radialzuwachsdaten geprüft. Dabei werden die Abweichungen der täglich aufgelösten Witterungsdaten vom langjährigen Mittel zu einem Intervall von minimal 21 und maximal 121 Tagen zusammengefasst und beginnend ab dem 1. Juli des Vorjahres bis zum 31. Oktober des laufenden Jahres in einem sich entlang der Zeitachse bewegendem Fenster (*moving time window*) geprüft. Dieser intensive Suchalgorithmus führt dazu, dass insgesamt 42.218 Pearson Produkt-Moment-Korrelationen pro Witterungsvariable geprüft werden. Anschließend werden dem Nutzer für die beiden analysierten Witterungsparameter jeweils maximal fünf unterschiedliche Zeitintervalle vorgeschlagen, die im zweiten Programmteil für eine Hauptkomponentenregression (*Principal component regression*, PCR, sie entspricht i. W. der o.g. *response function*) verwendet werden können. Ziel dieses zweiten Programmteils ist eine möglichst genaue Übereinstimmung von aufgrund der ausgewählten Witterungsparameter modellierten Radialzuwächse mit den beobachteten Radialzuwächsen zu erhalten und dieses Modell für Zuwachsprognosen anhand bestimmter Klimaszenarien zu verwenden. Der zweite Teil des CLIMTREG-Programmes wurde in dieser Arbeit nicht verwendet, vielmehr beschränkte sich die Anwendung des Programms auf die Überprüfung und Detaillierung der Erkenntnisse, die aufgrund der *response functions* mit den Monatswerten gewonnen wurden.

3.4.3.5 Berechnung von Trockenstresskennzahlen (Trockenstress-Sensitivität)

Die im vorstehenden Kapitel aufgeführten Methoden eignen sich, um die generellen Zusammenhänge zwischen dem Radialzuwachs von Baumarten und den Witterungsverhältnissen an einem Standort aufzuzeigen. Diese Zusammenhänge können jedoch völlig unabhängig von der Fähigkeit einer Baumart sein, extreme Perioden mit knapper Wasserversorgung zu überstehen. Dabei können die Baumarten sehr unterschiedliche Anpassungsmechanismen entwickeln. Denkbar ist z.B. dass eine Baumart in der trockenen Extrempériode ihren Zuwachs „bewusst“ sehr stark reduziert, damit der vorhandene Wasserstress nicht zu einer Beeinträchtigung weiterer physiologischer Vorgänge führt. Nach der Trockenperiode kann sich diese Baumart, aufgrund der eingesparten Ressourcen, vermutlich auch rasch wieder erholen und das Zuwachsniveau von vor

der Trockenperiode erreichen oder bei günstigen Bedingungen sogar übertreffen. Eine andere Baumart dagegen, reagiert in ihrem Zuwachs dagegen vielleicht sehr viel träger auf Trockenstress. Dies kann einerseits an ihrer an Trockenstress angepassten Physiologie, andererseits aber auch an ihrer mangelnden Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Verhältnisse liegen kann. Die Frage, welche der beiden Baumarten letztendlich trockenstress-toleranter ist, ist alles andere als trivial. Unter Trockenstress-Toleranz ist aus forstlichen Gesichtspunkten die Aufrechterhaltung der Volumenproduktion von Interesse, aber auch die Vermeidung von Mortalität. Erst mittel- bis langfristige Beobachtungen können hierzu detaillierte Aufschlüsse geben.

Für die Analyse einzelner Trockenjahre haben LLORET ET AL. (2011) das Konzept der Trockenstresskennzahlen, ausgedrückt über die Begriffe: *Resistenz*, *Recovery* und *Resilienz*, für jahrringbasierte Untersuchungen eingeführt. PRETZSCH ET AL. (2013) haben dieses Konzept für den Vergleich der Zuwachsreaktionen anhand der Grundfläche in Rein- und Mischbeständen angewandt. Ältere dendrochronologische Untersuchungen (GÜNTHER 1954; KRÖNER 1952; SCHOBER 1951a) zu den Trockenstressreaktionen der Baumarten verwenden ähnliche Kennzahlen, wie die von LLORET ET AL. definierten, ohne dass die entsprechenden Begrifflichkeiten schon genutzt wurden. Resistenz und Resilienz sind auch im Zusammenhang mit pflanzenphysiologischen Stresskonzepten oder pflanzen-soziologischen Untersuchungen beispielsweise zur ökologischen Stabilität bzw. zum ökologischen Gleichgewicht definiert worden (SCHULZE ET AL. 2002). Für jahrringbasierte Untersuchungen existieren zu diesen Begrifflichkeiten, außer den von LLORET ET AL. vorgeschlagenen Definitionen, keine weiteren. Im Folgenden werden die Begriffe im Anhalt an die Definitionen von LLORET ET AL. erläutert und verwendet. Auf einen Vergleich mit der pflanzenphysiologischen oder pflanzen-soziologischen Definition der Begriffe wird bewusst verzichtet, da dieser sehr umfangreich ausfallen müsste und aufgrund der unterschiedlichen Akzentuierung hier nur zur Verwirrung beitragen würde.

Unter *Resistenz* versteht man allgemein die Widerstandsfähigkeit eines Systems gegenüber Störungen. Für den Bereich der Jahrringforschung bedeutet dieses, dass Bäume auf Störungen, also z.B. auf Trockenjahre, mit Zuwachseinbrüchen reagieren. Je geringer der Zuwachseinbruch im Vergleich zum Ausgangszustand ist, desto höher ist die *Resistenz* des individuellen Baumes. Die *Recovery* stellt dagegen die Erholungsreaktion nach einer Störung dar. Der Zuwachs im zu definierenden Erholungszeitraum wird dem Zuwachs während der Störungsphase gegenübergestellt. Je höher der Recovery-Wert, desto erfolgreicher verläuft die Erholung eines Baumes, sie verläuft also schneller und erreicht ein höheres Niveau. Schließlich drückt die Kennzahl der *Resilienz* die Belastbarkeit eines Systems aus. Dabei wird der Zuwachs im Erholungszeitraum mit dem Zuwachs im Referenz- oder Ausgangszeitraum verglichen. Ein Wert nahe 1 bedeutet, dass das Zuwachsniveau von vor der Störung fast erreicht wurde, bei Werten über 1 wird dieses sogar überschritten. Aus einem Resilienz-Wert von über 1 kann jedoch nicht abgeleitet werden, dass eine bestimmte Baumart Trockenperioden im Sinne von Eustress benötigt, damit sie anschließend umso höhere Zuwächse leisten kann. Vielmehr wird das Niveau des Resilienz-Wertes durch die im Erholungszeitraum vorliegenden Wachstumsverhältnisse, i. W. also die Wasserversorgung geprägt sein. Um diese in den jeweiligen Zeiträumen darzustellen, werden die in Abbildung 13 vorgestellten Dreiecksgrafiken um die Werte des relativen Matrixpotenzials in den analogen Zeiträumen ergänzt (vgl. Kapitel 3.4.3.6)

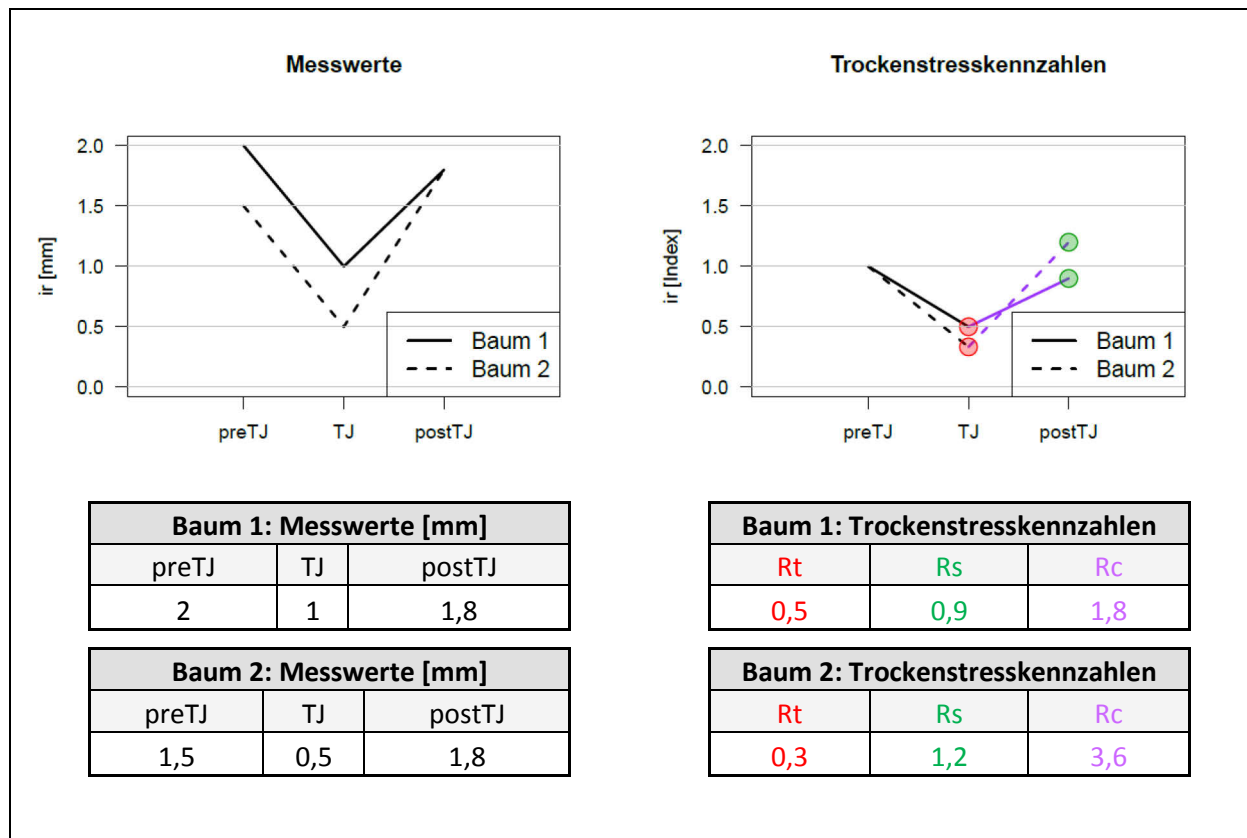


Abbildung 13: Messwerte (links) und resultierende Trockenstresskennzahlen (rechts) für zwei Beispielbäume

In der rechten Grafik mit den auf 1.0 referenzierten Werten wird deutlich, dass Baum 2 zwar eine geringere Resistenz (Rt), aber trotzdem eine höhere Resilienz (Rs) aufgrund der deutlich stärker ausgeprägten Erholungsreaktion (Rc) hat.

Mathematisch lassen sich die Kennzahlen in folgenden Formeln darstellen:

$$R_t = \frac{ir_{TJ}}{ir_{preTJ}} \quad [\text{Formel 6.1}]$$

$$R_c = \frac{ir_{postTJ}}{ir_{TJ}} \quad [\text{Formel 6.2}]$$

$$R_s = \frac{ir_{postTJ}}{ir_{preTJ}} \quad [\text{Formel 6.3}]$$

Dabei bedeuten $R_t = \text{Resistenz}$, $R_c = \text{Recovery}$, $R_s = \text{Resilienz}$, ir_{TJ} = Radialzuwachs im Trockenjahr, ir_{preTJ} = mittlerer jährlicher Radialzuwachs im Referenzzeitraum vor dem Trockenjahr, ir_{postTJ} = mittlerer jährlicher Radialzuwachs im Erholungszeitraum nach dem Trockenjahr. Werden *Resistenz* und *Recovery* miteinander multipliziert ergibt sich die *Resilienz* ($R_t \times R_c = R_s$). Abbildung 13 verdeutlicht die Zusammenhänge anhand der Daten zweier Beispielbäume. Als vorteilhaft bei der Verwendung der Trockenstresskennzahlen erweist sich die Tatsache, dass direkt die gemessenen Radialzuwächse in deren Berechnung einfließen und nicht mit trendbereinigten Daten gearbeitet werden muss. Dadurch, dass für die Berechnung der Trockenstresskennzahlen nur kurze Ausschnitte aus der Radialzuwachsreihe ausgewählt werden, braucht kein Alterstrend entfernt oder Durchforstungseffekt aus den Zeitreihen entfernt werden (vgl. Kapitel 3.4.3.2). Auch unterschiedliche Zuwachsniveaus der Einzelbäume werden durch dieses Verfahren berücksichtigt und die Trockenstresskennzahlen miteinander vergleichbar.

Die Herausforderung bei der Ermittlung der Trockenstresskennzahlen besteht darin, den von einer Störung unbeeinflussten Ausgangszustand, sozusagen die „normale Jahrringbreite“ zu definieren und außerdem festzulegen, wann der Erholungszeitraum nach der Störung beendet ist. Dieser Fragestellung wurde sich in der vorliegenden Arbeit in zwei Schritten angenähert.

Der *Referenzzeitraum* sollte generell keine sich auf den Radialzuwachs auswirkenden außergewöhnlichen Ereignisse beinhalten. Die kurzfristigen Schwankungen im Referenzzeitraum sollten dadurch ausgeglichen werden, dass dieser mehrere Jahre umfasst. Aufgrund von möglichen Alterstrends, also abnehmenden Jahrringbreiten mit zunehmendem Alter, sollte der Referenzzeitraum nicht zu lange sein. Die mittelfristigen Schwankungen des Radialzuwachses, z.B. die Radialzuwachsveränderungen aufgrund von erfolgten Durchforstungen, sollten dagegen in den Referenzzeitraum einfließen. Eine einzelbaumweise visuelle Analyse unterschiedlich langer Referenzzeiträume ergab ein sehr heterogenes Bild bezüglich der vorhandenen mittelfristigen Schwankungen. Eine vergleichende, visuelle Analyse der mittleren Trockenstresskennzahlen aller Buchen und Eichen mit unterschiedlichen langen Referenzzeiträumen zeigt jedoch, dass sowohl für das Trockenjahr 1976 als auch für 2003 die Länge des Referenzzeitraumes einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Steigungen der Liniendiagramme hat (vgl. Abbildung 14). Es wurde deshalb entschieden, einen Referenzzeitraum von einheitlich 3 Jahren für alle Kollektive und beide Trockenjahre in den anstehenden Analysen zu berücksichtigen.

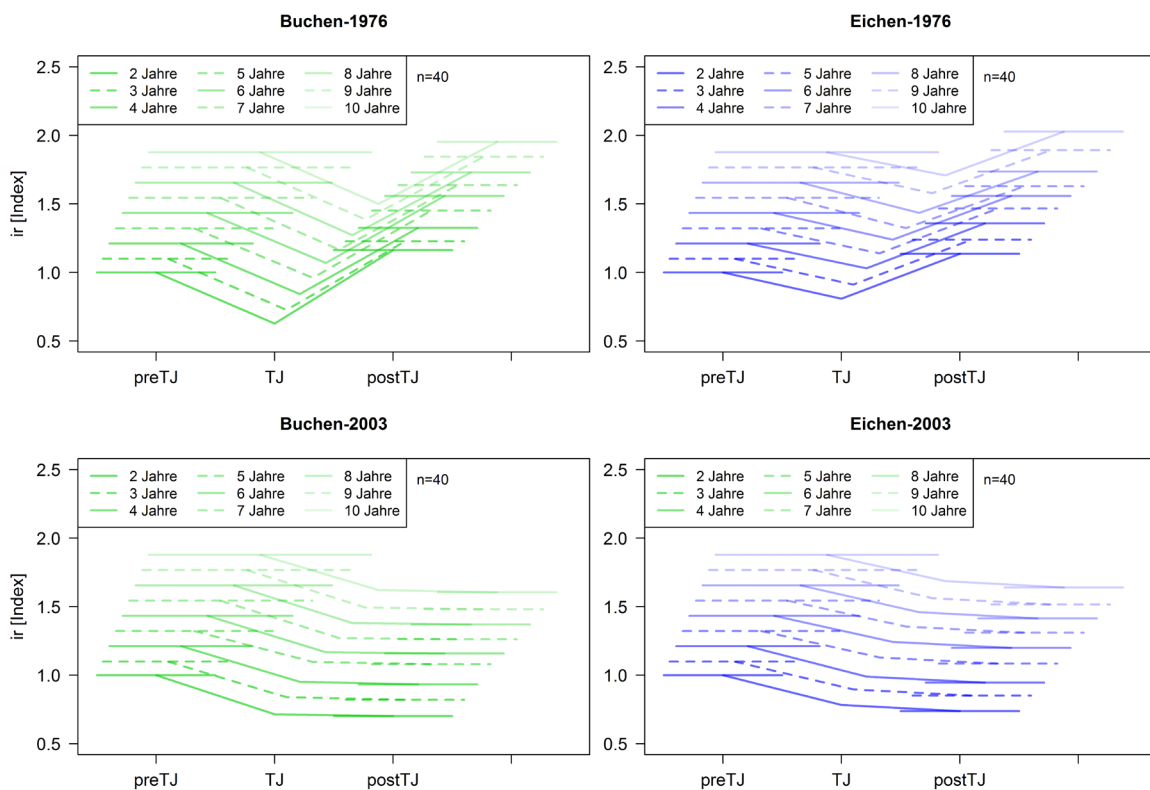


Abbildung 14: Veränderung der Trockenstresskennzahlen bei unterschiedlich langen Referenzzeiträumen

In jeder der vier Teilabbildungen sind die Dreiecksdiagramme für gewählte Referenzzeiträume von zwei bis zehn Jahren Dauer gezeigt. Das Trockenjahr 1976 ist oben, das Trockenjahr 2003 unten dargestellt. Die Veränderung der Trockenstresskennzahlen für die Buchen ist links und für die Eichen rechts abgebildet. Auf der x-Achsen bedeuten: preTJ = Mittelwert der Jahrringbreiten im Referenzzeitraum, TJ = Mittelwert der Jahrringbreiten im Trockenjahr, postTJ = Mittelwert der Jahrringbreiten im Erholungszeitraum. Der Erholungszeitraum wurde für alle gezeigten Fälle auf zwei Jahre festgelegt.

Unterschiedlich lange Referenzzeiträume haben nur einen minimalen Einfluss auf das Verhältnis der Trockenstresskennzahlen zueinander. Im Fall der Buchen im Trockenjahr 1976 verändert sich die Erholungsreaktion geringfügig, wenn zwei oder drei Jahre als Referenzzeitraum gewählt werden. Bei drei und mehr Jahren Referenzzeitraum bleibt die Trockenstressreaktion stabil.

Um die Länge des *Erholungszeitraumes* festzulegen, wurden die mit dem 3jährigen Mittelwert des Referenzzeitraums standardisierten mittleren Index-Kurven aller untersuchten Buchen und Eichen im entsprechenden Zeitabschnitt graphisch dargestellt (vgl. Abbildung 15). Im Ergebnis zeigt sich, dass nach dem Trockenjahr 1976 bereits nach zwei Jahren (nach 1978) ein neuerlicher Einbruch der mittleren indexierten Jahrringbreiten erfolgt. Nach 2003 ist erst nach dem Jahr 2007 ein erneuter Rückgang zu verzeichnen. Für das Jahr 1976 wurde aufgrund dieser Analyse ein Erholungszeitraum von zwei Jahren (1977 und 1978) und für das Jahr 2003 ein Erholungszeitraum von vier Jahren (2004 bis 2007) gewählt. Eine visuelle Analyse der indexierten Jahrringbreiten für die jeweilige Standort-Baumarten-Kombination (nicht gezeigt) bestätigte die gewählte Dauer für die Erholungsreaktion auf dieser Ebene.

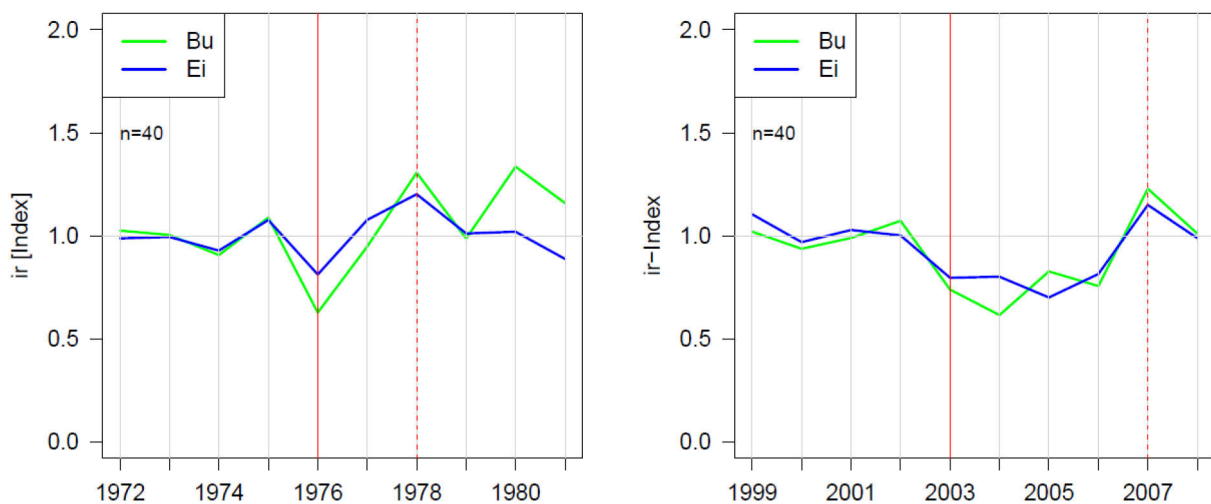


Abbildung 15: Vergleich der auf den Referenzzeitraum standardisierten mittleren Jahrringbreiten von Buchen und Eichen vor und nach den Trockenjahren 1976 (links) und 2003 (rechts)

Die rote durchgezogene vertikale Linie kennzeichnet das Trockenjahr, die rote gestrichelte Linie das Ende des Erholungszeitraumes. Die Standardisierung erfolgte einzelbaumweise mit den jeweiligen Mittelwerten des Referenzzeitraums (1973-1975, bzw. 2000-2002).

Die Erholungsphase endet nach dem Trockenjahr 1976 bereits mit dem Jahr 1978, die Erholungsphase nach dem Trockenjahr 2003 jedoch erst mit dem Jahr 2007.

3.4.3.6 Berechnung des relativen Matrixpotenzial analog zu den Trockenstresskennzahlen

Um die Wasserversorgung während des Trockenjahres und im Erholungszeitraum an einem bestimmten Zeitraum oder für ein bestimmtes Kollektiv aufzuzeigen, wurden analog zu den Trockenstresskennzahlen für jeden Standort relative Matrixpotenziale berechnet. Da es sich beim Matrixpotenzial um Werte mit negativem Vorzeichen handelt, werden die Brüche der Formeln 1.1 bis 1.3 entsprechend umgedreht (umgekehrter Dreisatz).

$$\psi_{Rt} = \frac{\psi_{preTJ}}{\psi_{TJ}} \quad [\text{Formel 7.1}]$$

$$\psi_{Rc} = \frac{\psi_{TJ}}{\psi_{postTJ}} \quad [\text{Formel 7.2}]$$

$$\psi_{Rs} = \frac{\psi_{preTJ}}{\psi_{postTJ}} \quad [\text{Formel 7.3}]$$

Dabei bedeuten ψ_{Rt} : relatives Matrixpotenzial im Trockenjahr bezogen auf das mittlere Matrixpotenzial während der Vegetationszeit (April-Sept) der 3 Jahre vor dem Trockenjahr (Referenzzeitraum), ψ_{Rc} : relatives Matrixpotenzial im Erholungszeitraum (zwei oder vier Jahre) bezogen auf das mittlere Matrixpotenzial während der Vegetationszeit (April-Sept) im Trockenjahr, ψ_{Rs} : relatives Matrixpotenzial im Erholungszeitraum (zwei oder vier Jahre) bezogen auf das mittlere Matrixpotenzial während der Vegetationszeit (April-Sept) der drei Jahre vor dem Trockenjahr, sowie ψ_{Tj} : mittleres Matrixpotenzial während der Vegetationszeit im Trockenjahr, ψ_{preTj} : mittleres Matrixpotenzial während der Vegetationszeit (April-Sept) der drei Jahre vor dem Trockenjahr, ψ_{postTj} : mittleres Matrixpotenzial während der Vegetationszeit (April-Sept) der zwei (1976) oder vier (2003) Jahre nach dem Trockenjahr.

3.4.3.7 Trockenstresskennzahlen entlang des Gradienten der Wasserverfügbarkeit

Um eine eventuelle Veränderung der Trockenstressreaktionen der beiden Baumarten mit einer abnehmenden mittleren Wasserversorgung des Standortes überprüfen zu können, wurden die mittleren Trockenstresskennzahlen der Standort-Baumarten-Kombination entlang der mittleren absoluten Matrixpotenzialwerte in der Vegetationszeit im Trockenjahr dargestellt und mittels linearer Regression ausgeglichen (Funktion lm in R, Version: 2.15.3, R CORE TEAM 2013). Der Standardfehler für die Trockenstresskennzahlen wurde aus den jeweils fünf Einzelwerten (ein Wert pro Baum) berechnet, der Standardfehler der Matrixpotenzialwerte wurde aus den sechs Zeitreihen pro Standort berechnet und anschließend ein Mittelwert über die Tageswerte gebildet.

Um zusätzlich eine Aussage zur eventuellen Abhängigkeit der Trockenstresskennzahlen von der standortsspezifischen Trockenstress-Intensität zu erhalten, wird das trockenjahr-spezifische, Matrixpotenzial-Index ($I\psi_{Tj}$) als Bezugsgröße eingeführt. Dieses berechnet sich aus dem Quotienten der mittleren Matrixpotenzialwerte während der Vegetationszeit (April-Sept) im Trockenjahr (ψ_{Tj}) geteilt durch den Mittelwert des langfristigen Matrixpotenzials (1971-2010) während der Vegetationszeit ($\psi_{1971-2010}$), also:

$$I\psi_{Tj} = \frac{\psi_{Tj}}{\psi_{1971-2010}} \quad [\text{Formel 8}]$$

Die aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell LWF-BROOK-90 resultierenden, täglichen Matrixpotenzialwerte wurden dabei zunächst über die sechs Zeitreihen pro Standort und anschließend über die Vegetationsperiode (April bis Sept) gemittelt. Für den Mittelwert des langfristigen Matrixpotenzials ($\psi_{1971-2010}$) wurde wiederum der arithmetische Mittelwert der Jahreswerte berechnet. Die lineare Regression wurde dann mit dem trockenjahr-spezifischen Matrixpotenzial-Index als Prädiktor und den Trockenstresskennzahlen der Standort-Baumarten-Kombination als Antwortvariable durchgeführt.

3.4.3.8 Direkter Vergleich der Jahrringbreiten - Trendbereinigung

Um eine Aussage zum unterschiedlichen Dickenwachstumsverhalten der beiden Baumarten über eine längere Zeitperiode zu erhalten, müssen die Radialzuwachsreihen von Buchen und Eichen direkt miteinander verglichen werden. Für diesen Vergleich sind stationäre Zeitreihen notwendig, d.h. Aussagen zu den Abweichungen vom Mittelwert müssen unabhängig vom Zeitpunkt möglich sein. Dies ist bei stationären Daten gegeben, da sie zu allen Zeitpunkten den gleichen Erwartungswert, die gleiche Varianz und die gleiche Kovarianz haben (AUER 2007). Die Absolutwerte der mittleren Radialzuwachsreihen für die Standort-Baumarten-Kombination weisen unterschiedlichen Trends auf und erfüllen das Kriterium der Stationarität damit nicht (vgl. Abbildung 16). Im gemeinsamen Überlappungszeitraum aller Altbestände (1932 bis 2010) weisen beide Baumarten an allen Standorten einen, im Hinblick auf den unter Kapitel 3.4.3.2 angesprochenen Alterstrend, atypischen ansteigenden Trend auf. Die Jungbestände zeigen dagegen für deren gemeinsamen

Überlappungszeitraum 1962 bis 2010 keinen einheitlichen Trend. Im direkten Vergleich der beiden Baumarten interessierten in dieser Untersuchung zunächst vor allem die kurzfristigen, jährlichen Schwankungen zwischen den beiden Baumarten. Die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten traten nach den Ergebnissen der Hauptkomponentenanalyse (vgl. Kapitel 4.5.3) bei den mit 20jährigem Spline trendbereinigten Radialzuwachsindices am stärksten hervor, weshalb die Radialzuwachsindices aus diesem Trendbereinigungsverfahren für den Vergleich der Baumarten ausgewählt wurden.

Der direkte Vergleich der Jahrringbreiten wurde mittels eines Quotienten der trendbereinigten Radialzuwächse durchgeführt. Dabei wurde der indexierte Radialzuwachs der Buchen durch den indexierten Radialzuwachs der Eichen dividiert. Der Quotient gibt also an, um wie viel Prozent der Radialzuwachs der Buchen, über oder unter demjenigen der Eichen liegt.

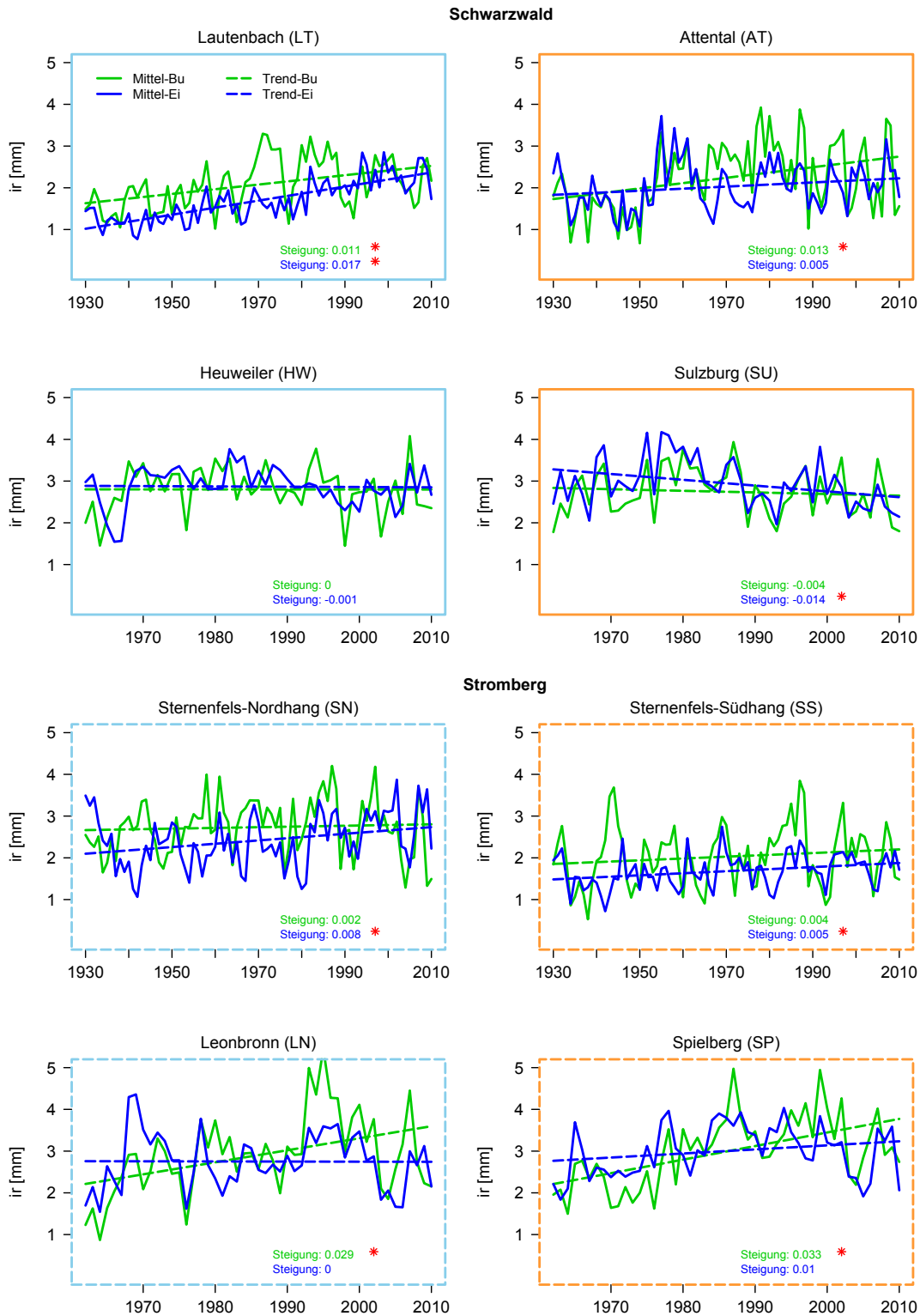


Abbildung 16: Trend der Radialzuwachsreihen von Buchen und Eichen an allen Untersuchungsstandorten

Dargestellt sind die Radialzuwachsreihen der Absolutwerte in 1.3 m Höhe für den jeweiligen gemeinsamen Überlappungszeitraum, d.h. für die Altbestände: 1930-2010 und für die Jungbestände: 1962-2010. Die Ausgleichsgeraden in den Diagrammen zeigen die linearen Trends für Buchen und Eichen (gestrichelte Linien). Rote Sternchen nach der Steigung kennzeichnen, dass es sich um eine signifikante Steigung handelt. Durchgezogene Randlinien um die Teildiagramme bedeuten: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinien: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinien: Nord(ost)hänge, orange Randlinien: Süd(west)hänge.

Die Absolutwerte der Radialzuwachsreihen haben auf Standortsebene sehr unterschiedliche Trends und sind damit nicht stationär.

3.5 Beschreibung der Standorte im Vergleich

3.5.1 Klimatische Verhältnisse an den ausgewählten Standorten im Vergleich

Die Abbildung 17 zeigt Niederschlagssumme und mittlere Monatstemperatur in der Vegetationszeit (April-Sept) für die acht Untersuchungsstandorte. Die Anordnung der Standorte von links nach rechts folgt dabei dem aufgestellten Wasserverfügbarkeitsgradienten, wobei als Reihungskriterium neben Niederschlag und Temperatur zusätzlich die Exposition des Standorts berücksichtigt wurde. Deshalb steht z.B. der südexponierte Standort Spielberg (SP) trotz höherer Niederschläge an 7. Stelle nach den beiden nordexponierten Standorten Leonbronn und Sternenfels Nordhang. Die Temperatur am Standort Spielberg (SP) fällt etwas aus dem Rahmen, kann aber mit der höheren mittleren Meereshöhe begründet werden. Im Anhang 7 sind die Klimadiagramme für alle Standorte ebenfalls für den Zeitraum der Klimanormale (1961 - 1990) abgebildet. Daraus ist ersichtlich, dass an allen Standorten die Niederschläge im Mai und Juni am höchsten waren, wobei insgesamt eine relativ gleichmäßige Verteilung auf alle Monate im Jahr an allen Standorten zu beobachten ist. Erkennbar sind auch die deutlichen Unterschiede zwischen den Standorten am Westabfall des Schwarzwaldes (erste Seite von Anhang 7) mit deutlich höheren Niederschlägen und den Standorten im Stromberg (zweite Seite von Anhang 7) mit insgesamt geringeren Niederschlägen. Die Temperaturkurven zwischen den Nord- und Südhängen in der Region unterscheiden sich dagegen kaum, was mit der geringen Auflösung des DWD-Griddatensatzes (1 x 1 km) begründet werden kann.

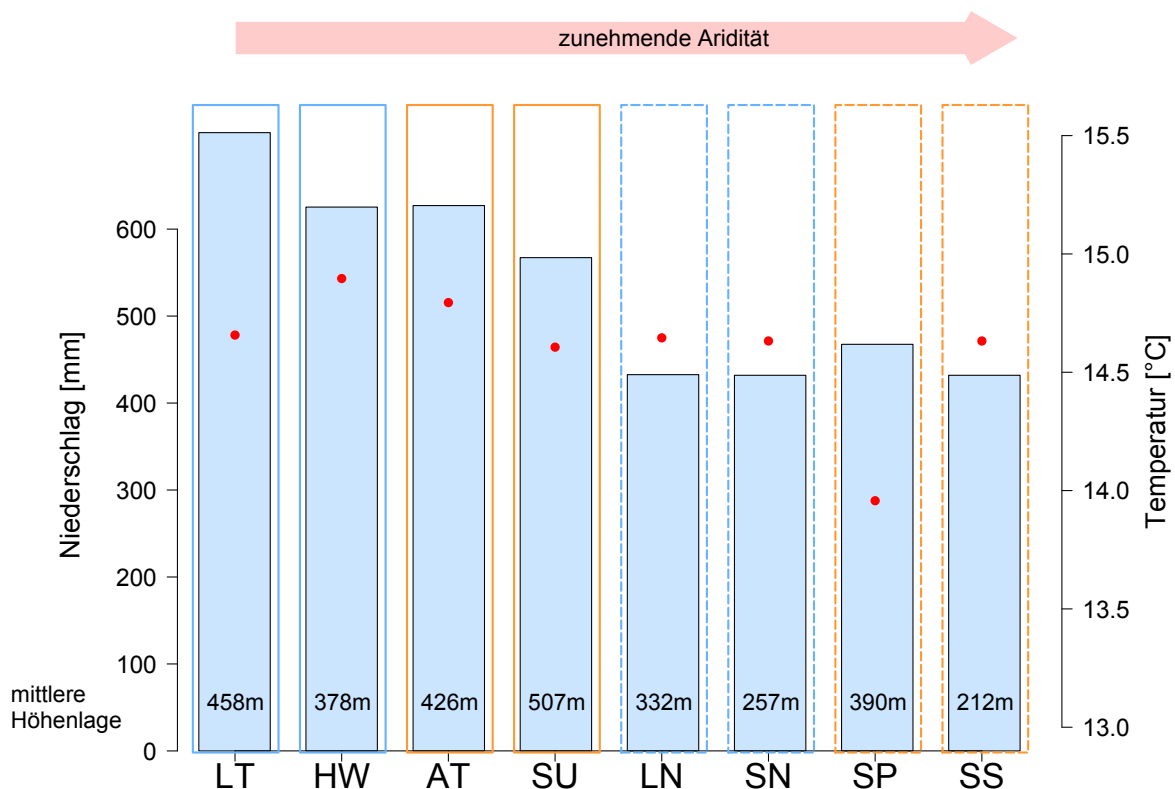


Abbildung 17: Durchschnittliche Niederschlagssumme und mittlere Monatstemperatur während der Vegetationszeit (April bis Sept) für alle Untersuchungsstandorte

Die Durchschnittswerte beziehen sich auf den Zeitraum 1961 bis 1990 (Klimanormale), Quelle: DWD-Griddaten. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Die Niederschläge nehmen von links nach rechts kontinuierlich ab, die Temperaturen ändern sich kaum. Unter der zusätzlichen Berücksichtigung der Exposition ist ein deutlicher Wasserverfügbarkeitsgradient im Untersuchungsdesign gegeben.

3.5.2 Auswertung zu den Bodenprofilen im Vergleich

Im Anhang 2 sind alle angelegten Bodenprofile beschrieben. Bei den Standorten im Schwarzwald handelt es sich durchgehend um skelettreiche humose Braunerden. Die mittleren Grobboden-Volumenanteile über die gesamte Profiltiefe (bis 60 cm) reichen bis 44 %. Die Oberböden der „Schwarzwald-Standorte“ bestehen aus teilweise schluffvergüteten lehmigen Sanden. Am Standort Lautenbach wurde ab ca. 50 cm Tiefe eine Tonanreicherung festgestellt. Die Standorte im Stromberg sind insgesamt etwas heterogener, es handelt sich dort um Pelosol- bis Pseudogley-Braunerden. Der mittlere Steingehalt pro Profil schwankt zwischen 5 und 25 %. Bei einem Profil am Standort Leonbronn (Profil-Nr. 3) steht der wasserstauende Ton bereits in 40 cm an. Auch an den Standorten Sternenfels – Nordhang und Spielberg ist bei je einem Profil die zumindest stauwasserleitende Schicht bereits in 40 cm erreicht. Abbildung 18 zeigt die Grobboden-Volumenanteile je Standort und Tiefenstufe, gemittelt über die drei Bodenprofile pro Standort. Die große Streuung pro Standort wird durch die Fehlerbalken deutlich.

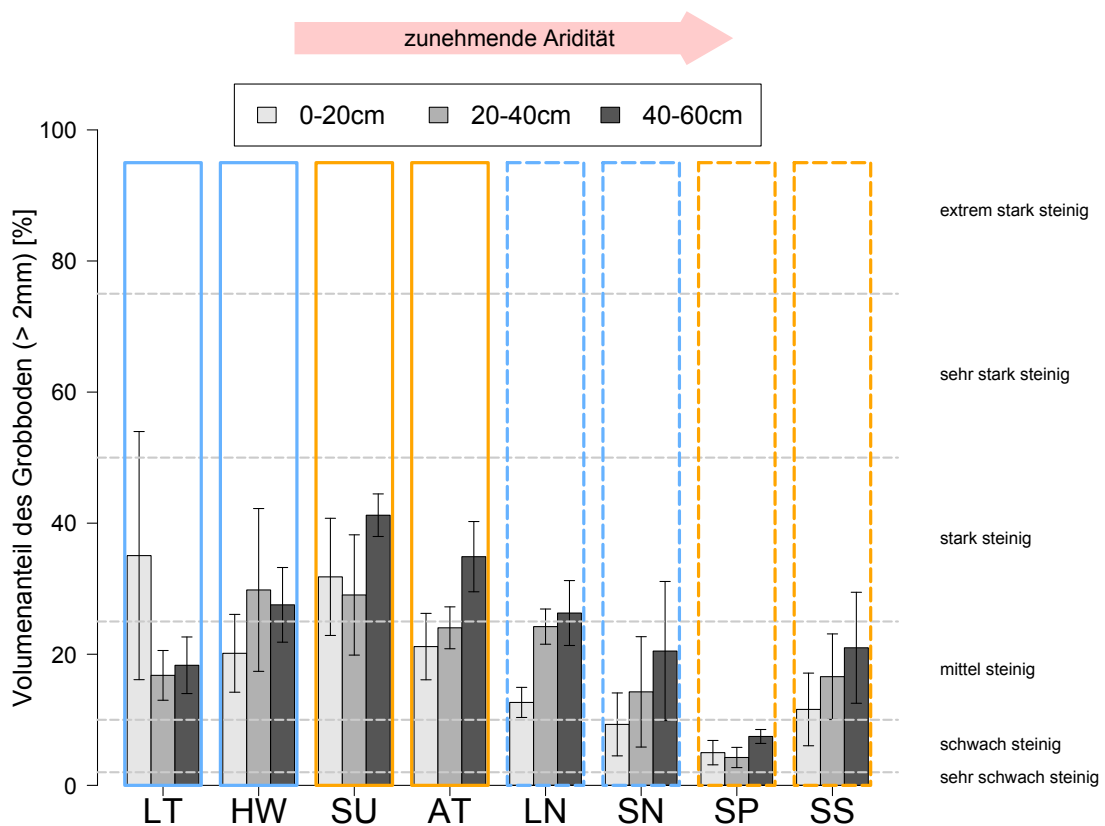


Abbildung 18: Mittlere Volumen-Anteile des Grobbodens (>2mm) pro Standort

In unterschiedlichen Grautönen dargestellt sind die verschiedenen Tiefenstufen, Mittelwerte der drei Bodenprofile incl. Standardfehler. Die horizontalen gestrichelten Linien kennzeichnen die Klassengrenzen, nach der KA5 (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005, 150). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Die Standorte im Schwarzwald (linke vier Balkengruppen) werden als „stark steinig“ eingestuft, die Standorte am Stromberg (rechte vier Balkengruppen), bis auf Spielberg (SP), als „mittel steinig“.

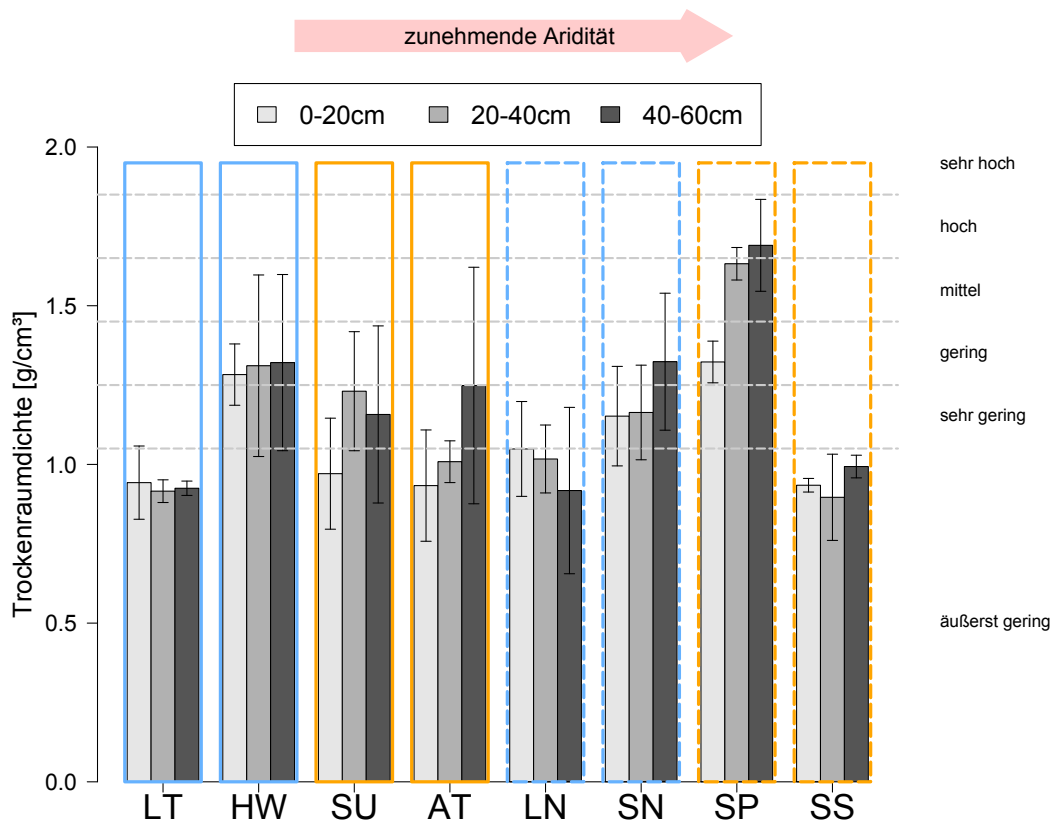


Abbildung 19: Mittlere Trockenraumdichten pro Standort

In unterschiedlichen Grautönen dargestellt sind die verschiedenen Tiefenstufen, Mittelwerte der drei Bodenprofile incl. Standardfehler. Die horizontalen gestrichelten Linien kennzeichnen die Klassengrenzen, nach der Einstufung durch die „Forstliche Standortsaufnahme“ (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996, 109). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge. Die Trockenraumdichten der Untersuchungsstandorte liegen im Bereich „äußerst gering“ bis „sehr gering“, lediglich der Standort Spielberg weist eine im Schnitt mittlere Trockenraumdichte auf.

Die ermittelten mittleren Trockenraumdichten pro Standort zeigen kein eindeutiges Muster, weder was die Verteilung auf die beiden Untersuchungsregionen noch, was die Zugehörigkeit zu den drei Tiefenstufen anbelangt (siehe Abbildung 19). Die Standorte im Schwarzwald sind nach der Einteilung des ARBEITSKREISES STANDORTSKARTIERUNG (1996) durch „geringe“ bis „äußerste geringe“ Trockenraumdichten gekennzeichnet. Die Standorte im Stromberg sind bezüglich der Trockenraumdichte sehr heterogen. Nur die beiden Standorte Attental und Spielberg zeigen die bei eingesetzten Tonverlagerungsprozessen typische höhere Trockenraumdichten im Unterboden.

Abbildung 20 zeigt die mittlere Anzahl von Feinwurzeln ebenfalls getrennt nach Tiefenstufen. Die hohe Wurzeldichte in den obersten 20 cm ist an allen Untersuchungsstandorten gegeben. Im Stromberg ist, trotz der in einzelnen Profilen erreichten stauwasser-beeinflussten Horizonte, bei ca. 40 cm keine veränderte Feinwurzelveilung bzw. -intensität im Vergleich zu den Schwarzwald-Standorten erkennbar. Im Vergleich zu den Einstufungen der „Bodenkundlichen Kartieranleitung, KA5“ (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005, 129) sind alle Standorte in der mittleren Tiefenstufe (20 -40 cm) „sehr stark“ bis „extrem stark“ und in der unteren Tiefenstufe noch „stark“ bis „sehr stark“ durchwurzelt.

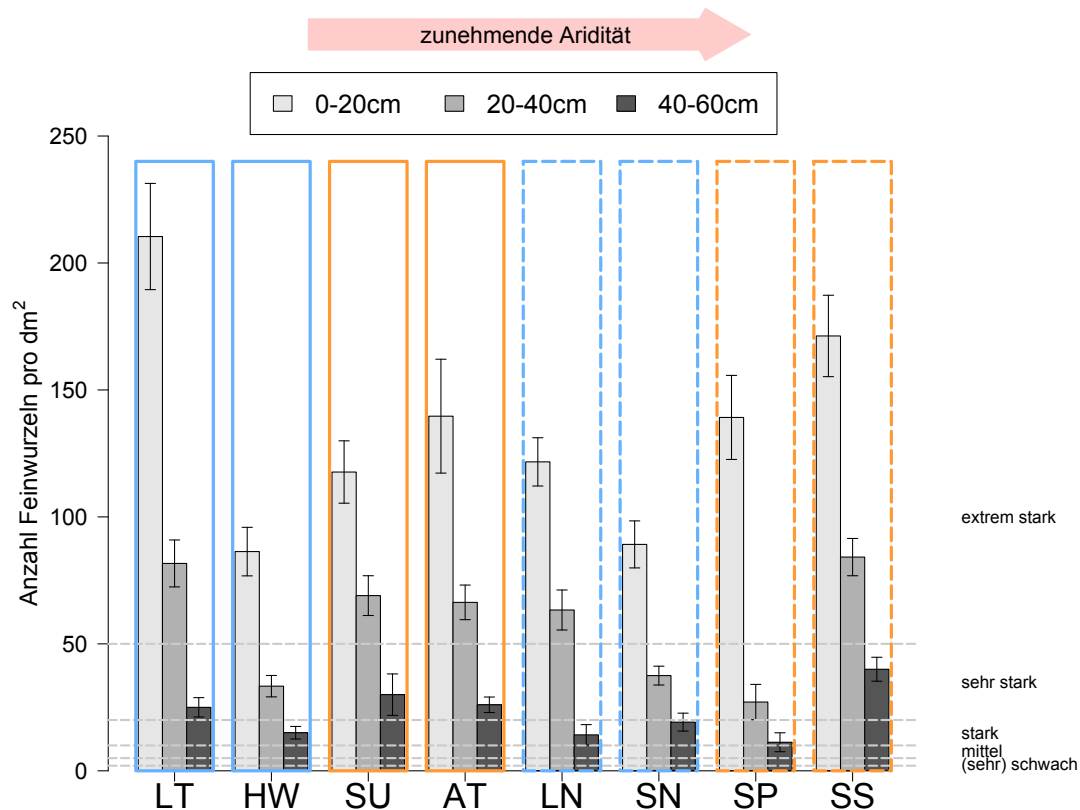


Abbildung 20: Mittlere Durchwurzelungsintensität pro Standort

In unterschiedlichen Grautönen dargestellt sind die verschiedenen Tiefenstufen, Mittelwerte der drei Bodenprofile incl. Standardfehler. Die horizontalen gestrichelten Linien kennzeichnen die Klassengrenzen, nach der KA5 (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005, 129). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Alle Untersuchungsstandorte sind sehr gut durchwurzelt. Im obersten Horizont (0-20 cm) „extrem stark“, selbst im untersten Horizont (40-60 cm) werden noch „starke“ bis „sehr starke“ Durchwurzelungsintensitäten erreicht.

3.5.3 Bodenchemie

Die Ergebnisse der chemischen Analyse des Oberbodens sind in Abbildung 21 dargestellt. Bis auf den Standort Spielberg liegen alle mittleren $\text{pH}_{(\text{KCl})}$ -Werte im Bereich der KA5-Einstufung „sehr stark sauer“ (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996, 367). Am Standort Spielberg verursacht die Abweichung eines Profils (Nr. 3 mit einem $\text{pH}_{(\text{KCl})}$ -Wert von 5.5) die Erhöhung des Mittelwerts. Die beiden anderen Profile an diesem Standort liegen ebenfalls im Bereich der o.g. Einstufung. Der mittlere $\text{pH}_{(\text{KCl})}$ -Wert über alle Profile liegt bei 3.5 und ist damit etwas niedriger als der für ganz Baden-Württemberg im Rahmen der Bodenzustandserhebung 1 (BZE 1) erhobene Mittelwert. Für die Tiefenstufe 10 - 30 cm wurde bei der BZE 1 ein Median an 177 Profilen von ca. 3.8 ermittelt (BUBERL ET AL. 1994, 23, Abb. 9). Auch die vorläufigen Ergebnisse der aktuellen Bodenzustandserhebung (BZE 2) zeigen für die Tiefenstufe 10 bis 30 cm einen $\text{pH}_{(\text{KCl})}$ -Wert in derselben Größenordnung wie nach der BZE 1 (pers. Mitteilung P. HARTMANN, FVA am 15.08.2014). Die Untersuchungsstandorte liegen damit im Oberboden im Bereich des Aluminium-Eisen-Pufferbereichs, was nach dem räumlichen Verteilungsmuster der BZE 1 (BUBERL ET AL. 1994, 24, Abb. 10b) zu erwarten war.

Die Basenversorgung der Standorte, also das Verhältnis der austauschbar gebundenen, *basischen* Kationen zu den austauschbar gebundenen, *sauren* Kationen, ist trotz des geringen pH-Werts noch im Bereich „basenarm“ bis „mittelbasisch“ laut den Einstufungsgrenzen der KA5 anzusiedeln

(ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996, 371). Auch hier stellt das Profil Nr. 3 vom Standort Spielberg mit einer Basensättigung von 93.6 % wieder eine Ausnahme dar.

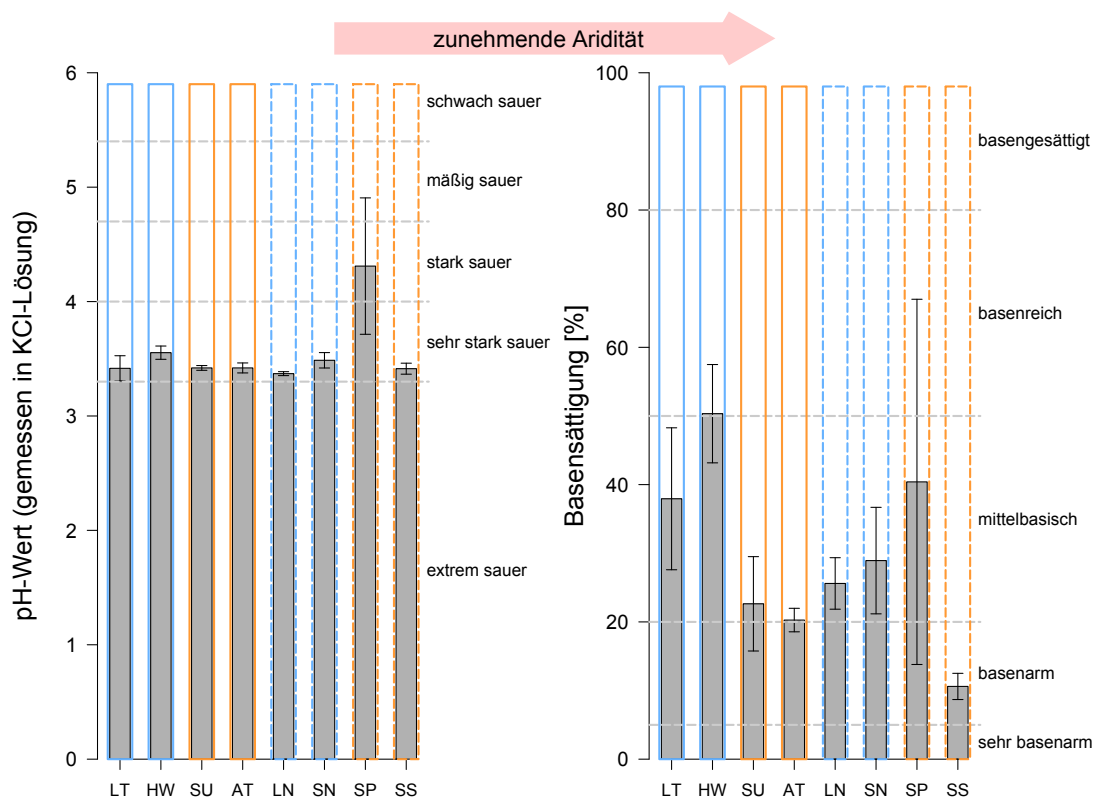


Abbildung 21: Mittelwerte von pH-Werten (links) und Basensättigung (rechts) im Oberboden der Untersuchungsstandorte

Dargestellt sind die Mittelwerte der 3 Bodenprofile pro Standort incl. Standardfehler. Die horizontalen gestrichelten Linien kennzeichnen die Klassengrenzen, nach der KA5 (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005, 367ff.). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Der pH-Wert fast aller Standorte liegt in der Klasse „sehr stark sauer“. Im Vergleich zu den Daten der Bodenzustandserhebung in Baden-Württemberg sind dies jedoch keine außergewöhnlichen Werte.

3.5.4 Bodenwasserhaushalt – Modellierungsergebnisse

Matrixpotenzial und Wassergehalt

Die Ergebnisse aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell bestätigen die im Untersuchungsrahmen angestrebte Abbildung eines Wasserverfügbarkeitsgradienten und die Reihenfolge, die bereits anhand der Klima- und Expositionsdaten aufgestellt wurde (vgl. Abbildung 17). In Abbildung 22 sind die Standorte im Vergleich zueinander bezüglich des mittleren Matrixpotenzials und des mittleren Wassergehalts in der Vegetationszeit (April-Sept) für den modellierten Zeitraum 1971 - 2010 dargestellt.

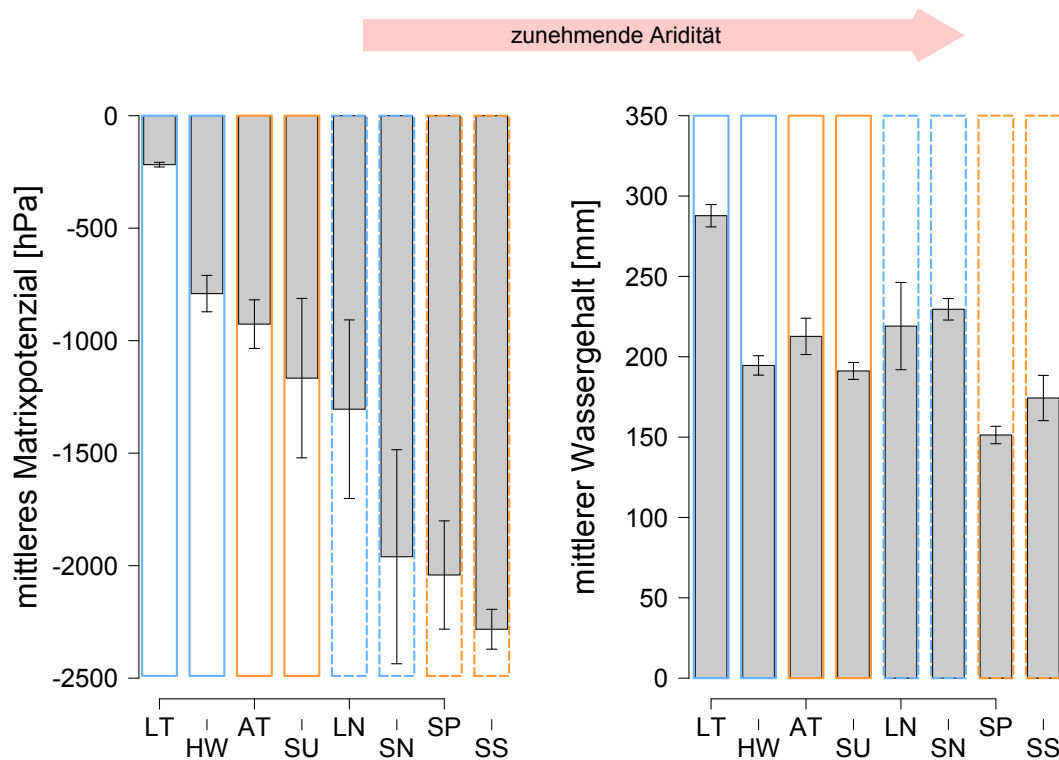


Abbildung 22: Mittelwerte des Matrixpotenzials (links) und des Wassergehalts (rechts) an den Untersuchungsstandorten.

Dargestellt sind die Mittelwerte aus sechs Zeitreihen pro Standort (drei Bodenprofile x zwei Baumarten) für die Vegetationszeit (April-Sept) im Zeitraum 1971-2010. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Das mittlere Matrixpotenzial in der Vegetationszeit bildet den Wasserverfügbarkeitsgradienten der Standorte sehr viel deutlicher ab als der mittlere Wassergehalt in der Vegetationszeit.

Die jährweise Analyse z.B. zum mittleren Matrixpotenzial in der Vegetationsperiode in den Jahren 1976 und 2003 (hierzu ist keine Grafik gezeigt) kommt bezüglich der Reihenfolge der Standorte zum selben Ergebnis wie die in Abbildung 22 dargestellte. Der mittlere Wassergehalt der Standorte spiegelt den Wasserhaushaltsgradienten nur unzureichend wieder. Lediglich die Südhänge am Stromberg haben einen deutlich geringeren Wassergehalt als die übrigen Standorte, der niederschlagsreichste Standort (Lautenbach, LT) dagegen einen deutlich höheren.

Schließlich wurde die Varianz der beiden Wasserhaushaltsgrößen Matrixpotenzial und Wassergehalt analysiert. Bei der Analyse der sechs Zeitreihen pro Standort, also von drei Bodenprofilen und zwei Baumarten, bestehend aus den täglichen Werten der beiden Ergebnisgrößen über den Zeitraum 1971-2010, zeigt sich, dass die trockenen Standorte eine deutlich höhere mittlere Streuung für die Matrixpotenzialwerte haben bzw. die mittlere Streuung mit zunehmender Trockenheit steigt (vgl. Abbildung 23, links). Die Varianz der Zeitreihen des volumetrischen Wassergehalts nimmt dagegen nur für die Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes mit zunehmender Trockenheit des Standortes zu, für die Standorte im Stromberg ist dieses Muster nicht zu erkennen. Diese Abweichung am Stromberg vom erwarteten Trend werden auf die an manchen Standorten deutlicher hervortretenden Unterschiede bezüglich der in den jeweiligen Tiefen vorgefundenen Bodenarten (vgl. Anhang 2) zurückgeführt.

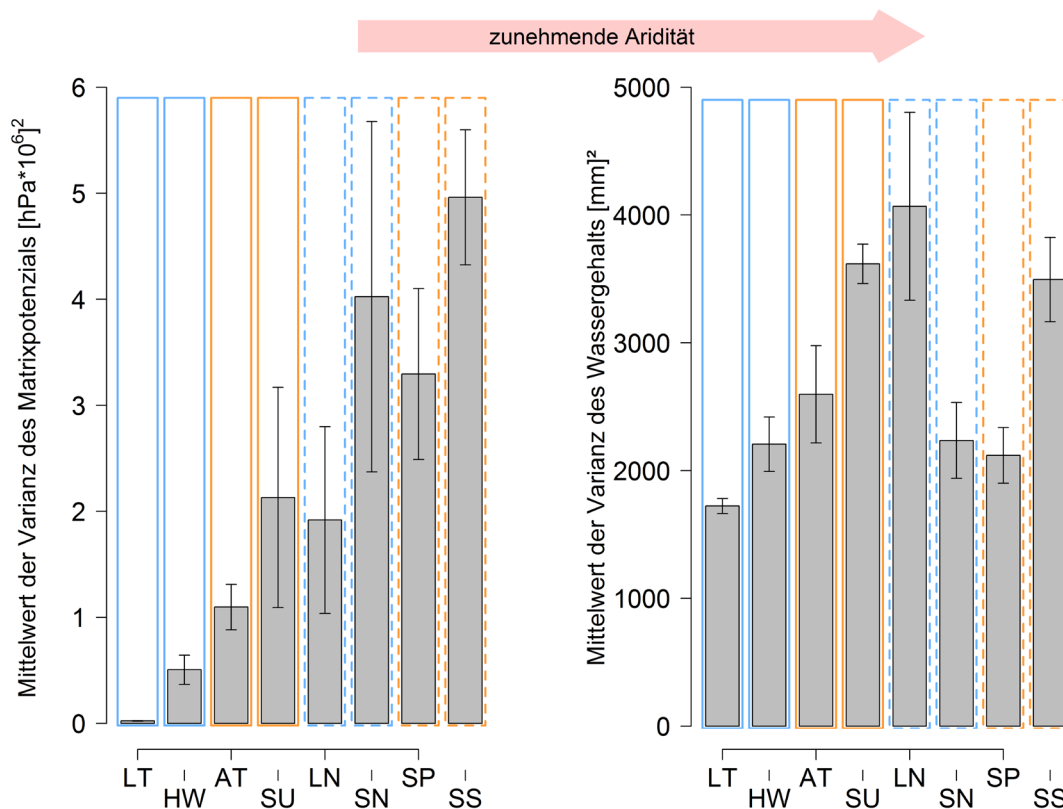


Abbildung 23: Mittelwert der Varianz der Zeitreihen mit den Tageswerten von Matrixpotenzial (links) und Wassergehalt (rechts)

Dargestellt sind die Mittelwerte der Varianz aus sechs Zeitreihen pro Standort (drei Bodenprofile x zwei Baumarten) für die Vegetationszeit (April-Sept) im Zeitraum 1971-2010. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Die Streuung der Zeitreihen des Matrixpotenzials nimmt mit zunehmender Aridität des Standorts zu, d.h. je trockener der Standort desto tiefere Extremwerte werden erreicht.

Transpiration

Von LWF-BROOK-90 werden anhand der Bestandesdaten und baumartenspezifischer Koeffizienten Werte für die aktuelle und die potenzielle Transpiration des Bestandes berechnet. Die aktuelle Transpiration von Bäumen hängt entscheidend vom Wasserangebot ab, weshalb der Quotient aus aktueller zu potenzieller Transpiration Hinweise für einen auftretenden Wassermangel geben kann. Für einen 81jährigen Fichtenbestand in Zusmarshausen erhalten HAMMEL UND KENNEL (2001, 77) eine gute Übereinstimmung (Bestimmtheitsmaß von 0.54) der trendbereinigten Jahrringbreiten mit dem von ihnen als „effektiven Transpirationsindex“ bezeichneten Transpirationsquotienten. Der „effektive Transpirationsindex“ berücksichtigt dabei nicht nur das Verhältnis von aktueller zu potenzieller Transpiration des aktuellen Jahres, sondern mittelt über dieses und die beiden Vorjahre.

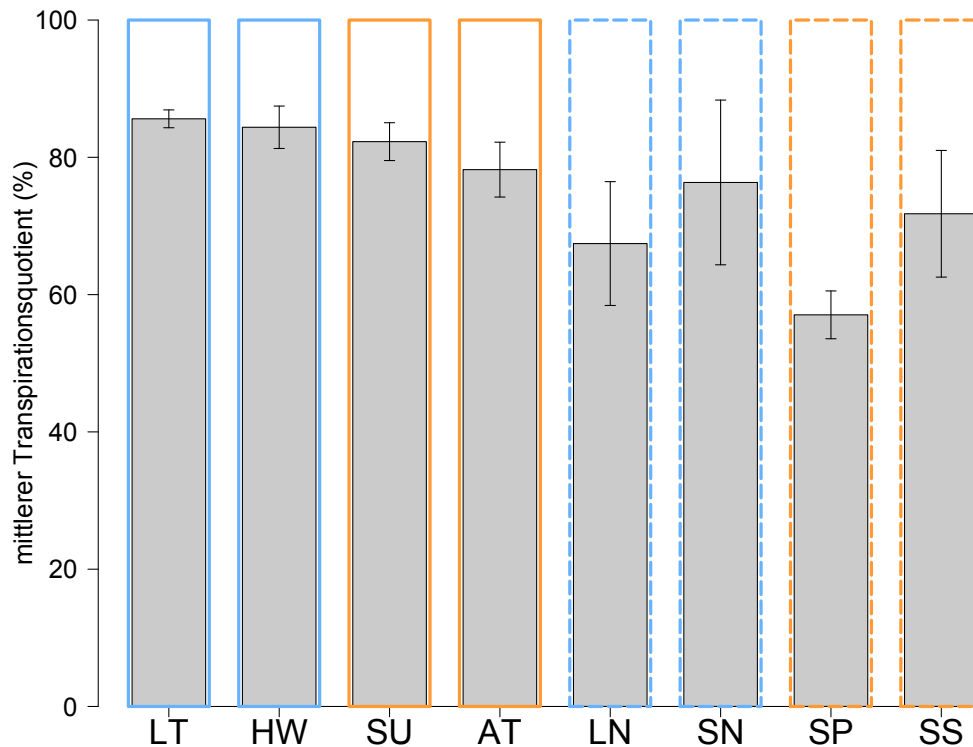


Abbildung 24: Mittlerer Transpirationsquotient der Untersuchungsstandorte

Datengrundlage sind die von LWF-BROOK-90 berechneten jährlichen Verdunstungssummen in der Vegetationszeit. Berechnet wurde der Mittelwert von sechs Zeitreihen pro Standort (drei Bodenprofile x zwei Baumarten) und daraus wieder der Mittelwert pro Standort über den Zeitraum 1971-2010, Darstellung incl. Standardfehler (n=40). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Der Vergleich der mittleren Transpirationsquotienten, gebildet aus den Mittelwerten der Zeitreihen von aktueller und potenzieller Transpiration über den Zeitraum 1971-2010, zeigt im Vergleich zu der anhand von Niederschlag, Temperatur und Exposition aufgestellten Reihenfolge der Standorte ein differenziertes Bild (vgl. Abbildung 24). Während bei den Standorten im Schwarzwald bis auf Attental (AT) alle Bestände im Schnitt einen Transpirationsquotienten von ca. 75 haben, sind die Unterschiede im Stromberg größer. Unerwarteterweise liegt der Standort Sternenfels-Südhang (SS), der als trockenster Standort eingeschätzt wurde, bezüglich des Transpirationsquotienten gleichauf mit dem gegenüberliegenden Hang (Sternenfels Nordhang, SN). Auch dieses dürfte mit der höheren nutzbaren Feldkapazität (vgl. folgender Abschnitt) des Standorts zusammenhängen. Am niedrigsten liegt der Transpirationsquotient nach dieser Berechnung am Standort Spielberg (SP) mit rund 53 %.

Nutzbare Feldkapazität

Abbildung 25 stellt die anhand der Retentionskurven in LWF-BROOK-90 ermittelten Werte für die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFK_{we}) der einzelnen Bodenprofile dar. Da die Bezugsgröße der effektive Wurzelraum ist, sind in diese Berechnungen bereits die in Kapitel 3.3.7 genannten Interpolationen für die Durchwurzelungsdichte, den Skelettanteil und die Bodenart ab 60 cm bis zur angenommenen Bodentiefe in zwei bzw. drei Meter eingeflossen. Diese Interpolationen beinhalten Unsicherheiten und können sich bei der Berechnung der nutzbaren Feldkapazität entsprechend auswirken. So sind die drei Ausreißer in Abbildung 24 (SNBP1, SSBP2 und SSBP3) auf die an diesen Standorten hohen Durchwurzelungsdichten auch in der untersten Tiefenstufe zurückzuführen (vgl. Anhang 2). Wie bereits erwähnt wurden für die vorliegende

Untersuchung möglichst frei drainierbare (sandige) Standorte ausgewählt. Die Böden an den Untersuchungsstandorten enthielten jedoch immer auch einen nicht unerheblichen Lehm- oder Schluffanteil (vgl. Anhang 2). Auch dies kann erklären, warum die nFK_{WE} -Werte der Untersuchungsstandorte nach der Klassifizierung der KA 5 (ARBEITSGRUPPE BODEN 2005, 367) im mittleren bis hohen Bereich liegen. Der Durchschnitt aller Bodenprofile ergibt eine mittlere nFK_{WE} von 145 mm. Im Vergleich zu den im Rahmen der Bodenzustandserhebung 2 eingeschätzten nFK_{WE} -Werten haben die Untersuchungsprofile also eine hohe Wasserspeicherkapazität. HARTMANN (2013) ermittelt für die 304 Stichprobenpunkte der BZE2 einen Median von 88.3 mm, nimmt jedoch keine Interpolation der im Rahmen des Aufnahmeverfahrens bis in 100 cm Tiefe ermittelten Durchwurzelungsdichten vor.

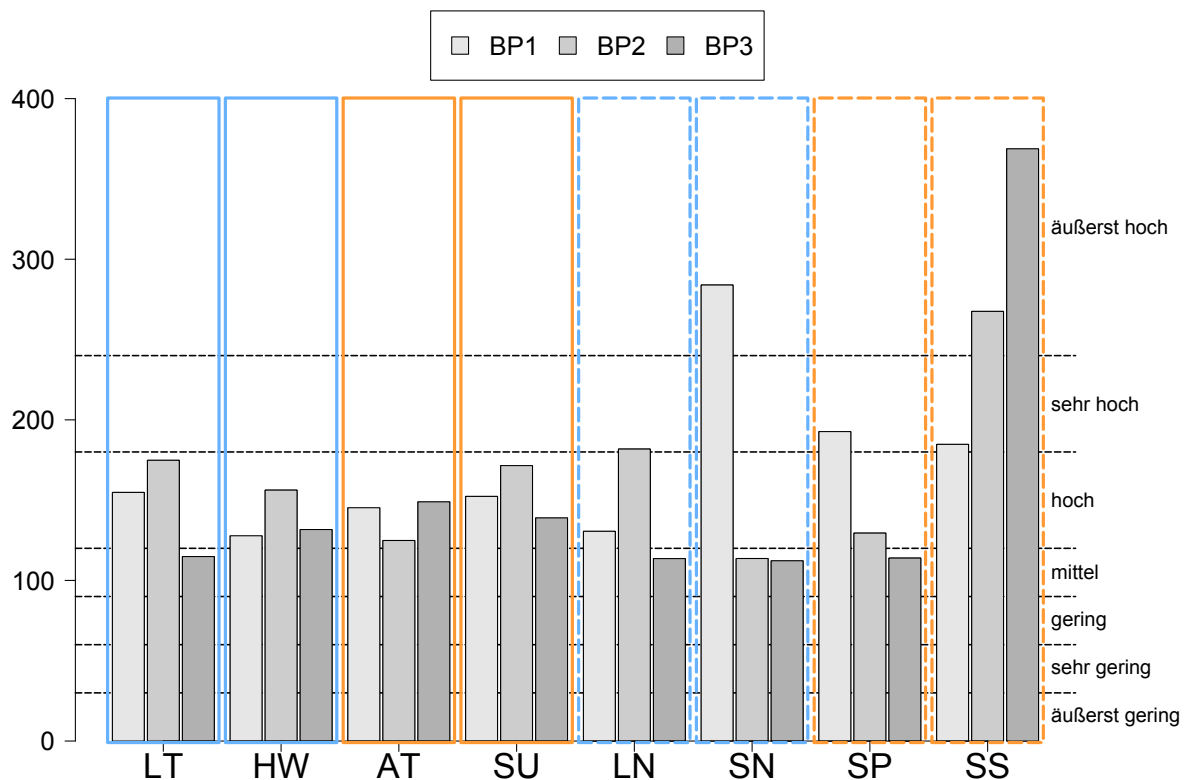


Abbildung 25: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum an den Untersuchungsstandorten

Die unterschiedlichen Grautöne stellen die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, d.h. bis zur geschätzten Durchwurzelungstiefe an den drei Bodenprofilen (BP 1 – BP 3) pro Standort dar. Die horizontalen gestrichelten Linien kennzeichnen die Klassengrenzen, nach der Einstufung durch die „Forstliche Standortsaufnahme“ (ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG 1996, 115, Tab. 44). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Die nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ist an allen Untersuchungsstandorten hoch.

3.6 Kennzahlen der Untersuchungsbäume

3.6.1 Alter, Bestockungsgrad und Bonität

Waldwachstumskundliche Kennzahlen zu den ausgewählten Untersuchungsbäumen und Beständen sind in Tabelle 4 aufgeführt. Es wird deutlich, dass bei den Jungbeständen der angestrebte Alterskorridor gut erreicht wurde, das mittlere Alter auf Stockhöhe beträgt zwischen 57.4 und 68.6 Jahren. Bei den Altbeständen hingegen ist die Altersspanne der fünf Untersuchungsbäume pro Standort und Baumart deutlich größer, das mittlere Alter auf Stockhöhe liegt hier zwischen 94.6 und 169.2 Jahren. Die für die Jungbestände angegebene Höhenbonität im Alter 50 zeigt, dass die Standortsbonitäten der Jungbestände nur geringe Unterschiede aufweisen,

wobei die Bestände im Stromberg leicht abfallen. Eine gewisse Ausnahme stellen die Eichen am Standort Heuweiler, einem Nordhang am Westabfall des Schwarzwaldes, dar. Sie waren im Alter 50 knapp 3 m höher als die benachbarten Buchen und auch deutlich höher als die Bäume auf allen anderen Untersuchungsflächen. Bei den Altbeständen handelt es sich größtenteils um Bestände, die bereits in Verjüngung stehen. Deren Grundflächen liegen demnach deutlich unter den anhand der Ertragstafeln berechneten Vergleichswerten. Während sich die mittleren Höhenbonitäten der Jung- und Altbestände im Alter 50 weitgehend entsprechen, fallen die mittleren dGz₁₀₀-Bonitäten der Altbestände deutlich ab.

Tabelle 4: Waldwachstumskundliche Kennzahlen der Untersuchungsbäume

Zur Ermittlung des Bestockungsgrades und der dGz₁₀₀-Bonität wurden die Ertragstafeln von SCHÖBER (1975) und JÜTTNER (1975) zusammengestellt in MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993), sowie für die einzelbaumweise gemischten Baumarten die dort vorgeschlagenen Ertragstafeln herangezogen. Der Bestockungsgrad wurde anhand der baumartenspezifischen Grundflächen im Verhältnis zu den Ertragstafelwerten berechnet. Für die Bestimmung der Bonität wurden die gemessenen Werte mit den ggfls. inter- und extrapolierten Ertragstafelwerten verglichen.

Standort-Baumarten-Kombination	mittleres Alter ±Std.Abw. (Stockkeil) [Jahre]	mittlerer Bestockungsgrad	Höhenbonität im Alter 50 ±Std.Abw. [m]	dGz ₁₀₀ -Bonität laut Ertragstafel [Vfm/ha und Jahr]
Jungbestände				
HWBu	68.6±7.5	0.9	23.8±1.7	8.8
HWEi	62.4±2.2		26.5±1.8	11.4
SUBu	59.4±1.7	1.0	22.2±1.4	8.6
SUEi	60.6±1.5		21.9±0.9	8.4
LNBU	63.0±1.6	0.9	23.1±2.5	8.5
LNEi	61.4±0.5		22.7±0.4	8.3
SPBu	60.2±2.9	0.8	21.4±1.7	8.2
SPEi	57.4±2.9		22.6±1.7	8.3
Altbestände				
LtBu	169.2±39.5	0.5	21.9±3.4	5.8
LtEi	167.6±5.5		21.8±2.3	6.0
ATBu	124.6±13.5	0.7	19.6±4.2	5.1
ATeI	107.5±1.7		20.0±1.4	4.7
SNBu	94.6±6.8	0.7	30.1±1.0	7.8
SNEi	97.0±6.0		27.7±0.8	8.0
SSBu	127.6±0.9	0.9	20.6±3.0	4.6
SSEi	128.0±7.8		20.9±1.3	5.1

3.6.2 Mittlerer Höhenzuwachs und Höhenwachstum

Der aus den Stammanalysen der Einzelbäume resultierende mittlere Höhenzuwachs pro Standort und Baumart ist in Abbildung 26 dargestellt. Die Jungbestände (HW, SU, LN und SP) haben erwartungsgemäß deutlich höhere mittlere Höhenzuwächse als die Altbestände. Von diesen fällt v.a. der Standort Sternenfels Nordhang (SN) auf, was jedoch mit dem deutlich geringeren Alter im Vergleich zu den weiteren Altbeständen erklärt werden kann. Insgesamt liegen an den jeweiligen Standorten Buchen und Eichen erstaunlich nah beieinander. Abgesehen von den o.g. Unterschieden zwischen Alt- und Jungbeständen sind auf dieser Ebene keine Unterschiede z.B. zwischen den Baumarten oder aufgrund der Zugehörigkeit der Bestände zu einer Region oder Exposition erkennbar. Einzig die Eichen am Standort Heuweiler fallen durch ein gegenüber den Buchen an diesem Standort deutlich höheren Höhenzuwachs auf. Aufgrund des abgebildeten Wasserhaushaltsgradienten, wäre eine deutliche Wuchsüberlegenheit der Eichen im

Höhenwachstum am ehesten für den Jungbestand auf dem südexponierten Hang des Stromberges (Standort SP) zu erwarten gewesen.

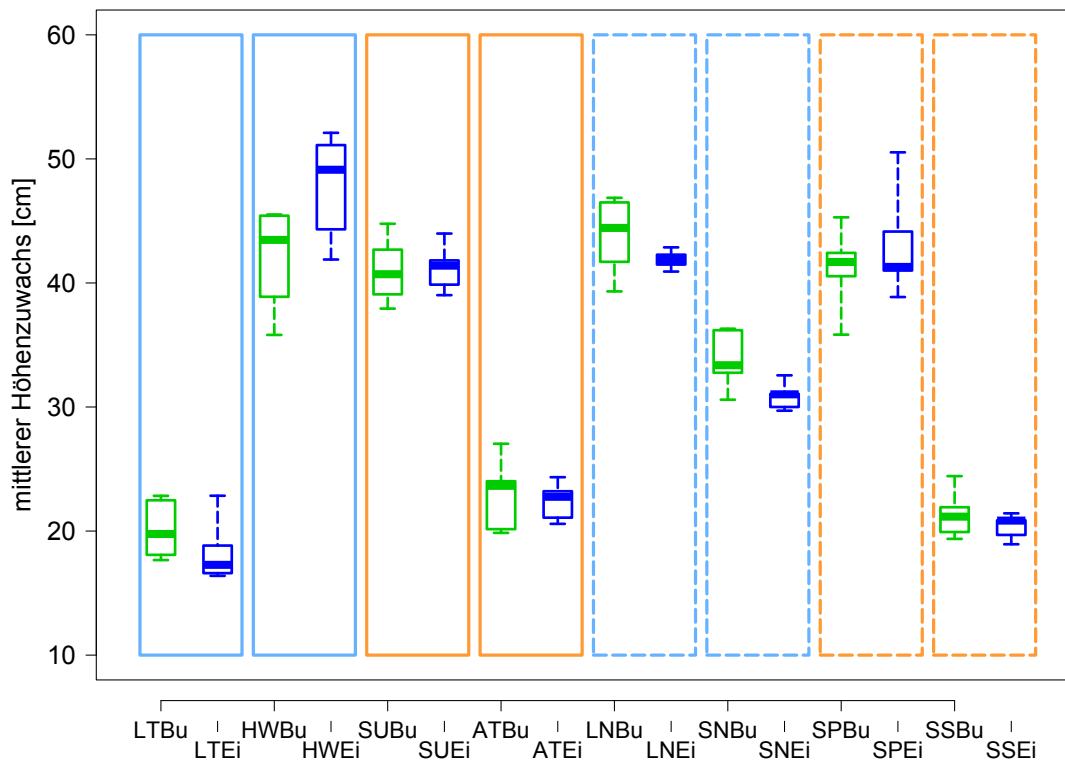


Abbildung 26: Mittlerer Höhenzuwachs der Untersuchungsbäume pro Standort getrennt nach Buchen und Eichen

Der Querbalken in den Boxplots gibt den Median für die jeweils fünf Bäume an, die Box selber kennzeichnet das obere und untere Quartil, die Whiskers geben die gesamte Spannweite der Daten an. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Die Jungbestände (HW, SU, LN SP) hatten in der Vergangenheit deutlich höhere Höhenzuwächse als die Altbestände (LT, AT, SS). Der jüngste Altbestand SN (Sternenfels Nordhang) liegt im Höhenzuwachs zwischen dem mittleren Niveau der Jungbestände und dem der Altbestände. Buchen und Eichen liegen im mittleren Höhenzuwachs sowohl in den Jung- als auch in den Altbeständen nah beieinander.

3.6.3 Mittlerer Radialzuwachs und Radialzuwachsverlauf

Der mittlere Radialzuwachs, hergeleitet aus dem Durchmesser in Brusthöhe und der Anzahl der Jahrringe auf der BHD-Scheibe, ist in Abbildung 27 dargestellt. Zunächst ist ersichtlich, dass Buchen und Eichen an fast allen Standorten auf demselben Niveau liegen, d.h. es wurden Bäume gleicher Dimension von beiden Baumarten ausgewählt. Lediglich am Standort Heuweiler (HW) ist der mittlere Radialzuwachs der Eichen etwas höher. An diesem Standort sind die Buchen im Schnitt sechs Jahre älter, was erklärt, warum auch an diesem Standort Buchen und Eichen mit ähnlichem Brusthöhendurchmesser gefällt wurden. Weiter fällt auf, dass der mittlere Radialzuwachs der Bäume am Standort Lautenbach (LT) deutlich unter dem Niveau der anderen Untersuchungsstandorte liegen, dieses kann durch das deutlich höhere Alter (ca. 170jährig) und den nachlassenden Zuwachs in diesem Alter erklärt werden. Schließlich sind die Boxen und damit das 1. und 3. Quartil für die Buchen etwas größer als für die Eichen (Ausnahme LT), was darauf hindeutet, dass die Unterschiede im mittleren Radialzuwachs der fünf Buchen größer war, als derjenige der Eichen. Am Standort Spielberg (SP) fällt auf, dass der obere Whisker bei den Eichen sehr weit von der Box weg reicht, tatsächlich hat dort der Untersuchungsbaum 5 einen mittleren Radialzuwachs von 3.7 mm, wohingegen die Bäume 1 bis 4 an diesem Standort einen Radialzuwachs von 2.7 bis 2.9 mm aufweisen. Die örtliche Lage von Baum 5 an diesem Standort

(vgl. Karte im Anhang 1) deutet darauf hin, dass dieser Baum vom Zuschusswasser am Mittelhang profitiert, die anderen vier Eichen stehen weiter oben am Hang. Interessanterweise schlägt dieser Effekt bei der „Partnerbuche“ (ebenfalls Baum 5) nicht so stark durch. Sie hat einen mittleren Radialzuwachs von 3.2 mm, während die anderen Buchen an diesem Standort einen Radialzuwachs von 2.3 bis 3.0 mm aufweisen.

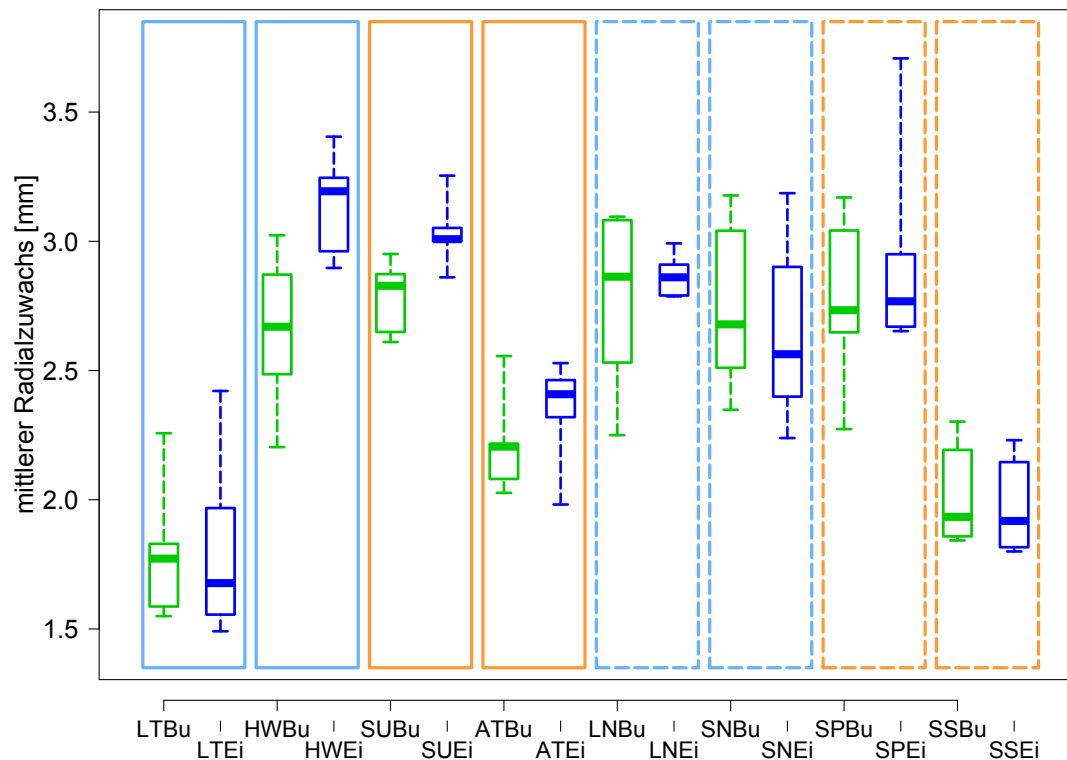


Abbildung 27: Mittlerer Radialzuwachs der Untersuchungsbäume pro Standort getrennt nach Buchen und Eichen

Der Querbalken in den Boxplots gibt den Median für die jeweils fünf Bäume an, die Box selber kennzeichnet das obere und untere Quartil, die Whiskers geben die gesamte Spannweite der Daten an. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Buchen und Eichen haben an allen Standorten etwa gleich hohe mittlere Radialzuwächse. Da beide Baumarten am jeweiligen Standort i.d.R. im Mittel gleich alt sind, bestätigt die Grafik, dass Bäume derselben Dimension ausgewählt wurden. Der etwas niedrigere Radialzuwachs der Buchen am Standort Heuweiler (HW), wird hinsichtlich der erreichten BHDs durch ihr geringfügig höheres mittleres Alter kompensiert.

Die aus der Vermessung der acht Radien pro BHD-Scheibe resultierenden mittleren Radialzuwachsverläufe sind im Anhang 5 dargestellt. Dabei sind die mittleren Radialzuwachsverläufe der fünf Bäume pro Standort und Baumart (schwarze dünne Linien) und die jeweilige mittlere Radialzuwachsserie aus diesen fünf Bäumen (grüne oder blaue dickere Linie) in einem Liniendiagramm dargestellt. Es fällt auf, dass, außer beim Standort Lautenbach (LT), kein Alterstrend in den Radialzuwachsserien vorhanden ist.

3.6.4 Dendrochronologische Kennzahlen

In Tabelle 5 sind der mittlere Radialzuwachs, dessen Standardabweichung, sowie die wichtigsten dendrochronologischen Kennzahlen für die Standorte getrennt nach den beiden untersuchten Baumarten angegeben. Grundlage der Daten ist der allen Standort-Baumarten-Kombinationen gemeinsame Überlappungszeitraum (1962 bis 2010). Über alle Standorte hinweg haben die Buchen einen geringfügig höheren Radialzuwachs ($2.65 \text{ mm} \pm 0.86 \text{ mm}$) als die Eichen ($2.48 \text{ mm} \pm 0.72 \text{ mm}$). Die höhere Standardabweichung im Radialzuwachs der Buchen entspricht den Angaben in der Literatur (z.B. BONN 2000) und muss auch vor dem Hintergrund der anderen Holzanatomie (Buche: zerstreutporig versus Eiche: ringporig) gesehen werden. Die dendrochronologischen Kennzahlen wurden von den trendbereinigten Jahrringbreiten (vgl. Kapitel 3.4.3.8) berechnet, lediglich für die

Autokorrelation mit lag 1 (AK1) sind zum Vergleich die Kennzahlen resultierend aus Absolutwerten mit angegeben.

Erwartungsgemäß ist die Sensitivität (Bu: 0.28, Ei: 0.20) der Buchen im Mittel etwas höher, als diejenigen der Eichen, wohingegen die (geringfügig) höhere Sensitivität der Altbestände (0.26) im Vergleich zu den Jungbeständen (0.22) überrascht. Interessanterweise berechnet BONN (1998, 66) für die von ihm analysierten Bestände fast identische Werte für die Sensitivität seiner untersuchten Bäume. Die Sensitivitätswerte seiner Buchenchronologien reichen von 0.185 bis 0.380 (im Mittel 0.26) und für seine Eichenchronologien von 0.156 bis 0.212 (im Mittel 0.18).

Die mittlere anhand der Absolutwerte berechnete AK1 der Eichen (0.51) ist etwas höher als diejenige der Buchen (0.46). Dabei schwanken die Werte der Buchen sehr viel stärker (von 0.237 bis 0.624) als diejenigen der Eichen (von 0.403 bis 0.558). Im Schwarzwald liegen bis auf den Standort Lautenbach (LT) die AK1-Werte der Eichen deutlich höher als diejenigen der Buchen. Im Stromberg zeigen dagegen die Buchen eine etwas höhere Autokorrelation als die Eichen (Ausnahme Sternenfels Südhang, SS). Offensichtlich hängt die Beeinflussung der Radialzuwächse durch das Vorjahr bei den Buchen sehr viel stärker von den standörtlichen Gegebenheiten ab, als bei den Eichen. Im Gegensatz zur Sensitivität weichen die AK1-Werte recht deutlich von denen ab, die BONN (BONN 1998, 68) für seine untersuchten Bäume angibt (Buchen: 0.6373, Eichen: 0.7837). BONN untersucht zwar insgesamt deutlich ältere Buchen und Eichen, da der Unterschied in der AK1 im hier vorgestellten Material aufgrund des Alters jedoch gering ist, wird davon ausgegangen, dass die Niveau-Unterschiede in der AK1 zwischen der Untersuchung von BONN und der hier vorgestellten, v.a. standörtlich und klimatisch bedingt sind. So gibt BONN für die von ihm untersuchten Bestände, bis auf eine Ausnahme, eine durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme von 530 bis 700 mm an (ebenda, S. 39, Tabelle 3). D.h. in den von ihm untersuchten Beständen ist von einer deutlich angespannteren Wasserversorgung auszugehen, als in den hier vorgestellten.

Aufgrund der Trendbereinigung mit dem 20jährigen Spline reduziert sich die AK1 über alle Kollektive und Untersuchungsbäume erheblich. Nach der Box-Pierce Test-Statistik weisen die Radialzuwachsreihen (Absolutwerte) von 67 der 80 Untersuchungsbäume p-Werte von unter 0.05 und damit signifikante Autokorrelationswerte beim lag 1 auf. Dies ist bei den mit 20jährigem Spline trendbereinigten Indexserien nur noch bei 26 Bäumen, davon 13 Buchen und 13 Eichen, von insgesamt 80 Untersuchungsbäumen der Fall.

Die mittlere Interserienkorrelation über alle STO-BA-Kombinationen ist für die Indexserien deutlich höher als für die Absolutwerte (0.70 versus 0.56). Zwischen den mit 10 und 20jährigem Spline trendbereinigten Indexserien ändert sich die mittlere Interserienkorrelation lediglich von 0.70 auf 0.71 (Daten nicht in Tabelle 5 enthalten), so dass für die Analyse der Witterungs-Wachstums-Beziehungen eine Trendbereinigung mit dem 20jährigen Spline als ausreichend erachtet wurde.

Das „Expressed population signal“ liegt für alle Kollektive, bis auf die Eichen am Standort Spielberg, über der von WIGHLEY ET AL. (1984) benannten Grenze von 0.85.

Tabelle 5: Mittlerer Radialzuwachs (BHD-Scheiben) und dendrochronologische Kennzahlen der Untersuchungsbäume, getrennt nach Buchen und Eichen

Betrachteter gemeinsamer Überlappungszeitraum: 1962-2010, SENS = Sensitivität, AK1 = Autokorrelation mit lag1, ISK = Interserienkorrelation, EPS = „Expressed Population Signal“, roh = berechnet anhand der gemessenen Rohdaten/Absolutwerte [mm], Spl20 = ermittelt anhand der mit 20jährigem Spline trendbereinigten Indexwerte. Der Wert für die Standort-Baumarten-Kombination ist jeweils das arithmetische Mittel der fünf Untersuchungsbäume.

Standort	Region	alt/ jung	Baum- art	Mittlerer i_r [mm]	StdAbw i_r [mm]	SENS (Spl20)	AK1 (roh)	AK1 (Spl20)	ISK (roh)	ISK (Spl20)	EPS (Spl20)
LT	Schw	alt	Bu	2,329	0,698	0,224	0,624	0,432	0,542	0,679	0,914
LT	Schw	alt	Ei	1,950	0,539	0,201	0,503	0,051	0,491	0,618	0,890
AT	Schw	alt	Bu	2,527	0,918	0,371	0,237	0,024	0,619	0,764	0,942
AT	Schw	alt	Ei	2,056	0,666	0,217	0,558	0,254	0,345	0,717	0,927
SN	Strom	alt	Bu	2,801	0,903	0,283	0,471	0,208	0,558	0,769	0,943
SN	Strom	alt	Ei	2,523	0,733	0,241	0,472	0,209	0,692	0,795	0,951
SS	Strom	alt	Bu	2,089	0,822	0,348	0,481	0,320	0,689	0,743	0,935
SS	Strom	alt	Ei	1,774	0,469	0,201	0,552	0,296	0,495	0,767	0,943
SU	Schw	jung	Bu	2,743	0,714	0,238	0,280	-0,014	0,570	0,710	0,925
SU	Schw	jung	Ei	2,947	0,703	0,190	0,403	-0,048	0,600	0,733	0,932
HW	Schw	jung	Bu	2,800	0,740	0,241	0,322	-0,016	0,461	0,701	0,921
HW	Schw	jung	Ei	2,868	0,586	0,147	0,554	0,333	0,525	0,628	0,894
LN	Strom	jung	Bu	2,905	1,116	0,283	0,604	0,289	0,651	0,675	0,912
LN	Strom	jung	Ei	2,751	0,811	0,227	0,509	0,213	0,637	0,769	0,943
SP	Strom	jung	Bu	2,991	0,985	0,244	0,628	0,202	0,644	0,609	0,886
SP	Strom	jung	Ei	3,001	0,811	0,188	0,528	0,233	0,455	0,495	0,831
Mittelwert Buchen				2,65	0,86	0,28	0,46	0,18	0,59	0,71	0,92
Mittelwert Eichen				2,48	0,66	0,20	0,51	0,19	0,53	0,69	0,91
Mittelwert Altbestände				2,26	0,72	0,26	0,49	0,22	0,55	0,73	0,93
Mittelwert Jungbestände				2,88	0,81	0,22	0,48	0,15	0,57	0,67	0,91
Mittelwert Schw				2,53	0,70	0,23	0,44	0,13	0,52	0,69	0,92
Mittelwert Strom				2,60	0,83	0,25	0,53	0,25	0,60	0,70	0,92

4 Ergebnisse

4.1 Klimastatistische Analyse der DWD-Daten an den Untersuchungsstandorten

4.1.1 Die Trockenjahre 1976 und 2003 im Vergleich zur Klimanormalperiode

Die Jahre 1976 und 2003 gelten für den südwestdeutschen Raum und für ganz Mitteleuropa als Trockenjahre. Selbst auf globalem Niveau gehen SCHINDLER UND MAYER (2007) davon aus, „...dass das Jahr 2003 zu den drei wärmsten Jahren seit Beginn der instrumentellen meteorologischen Beobachtungen [zählt].“ (ebenda, S. 34). Aufgrund der postulierten trockenen und warmen Witterungsbedingungen wurden diese beiden Jahre für die detailliertere Analyse des Wachstumsverhaltens der beiden untersuchten Baumarten ausgewählt.

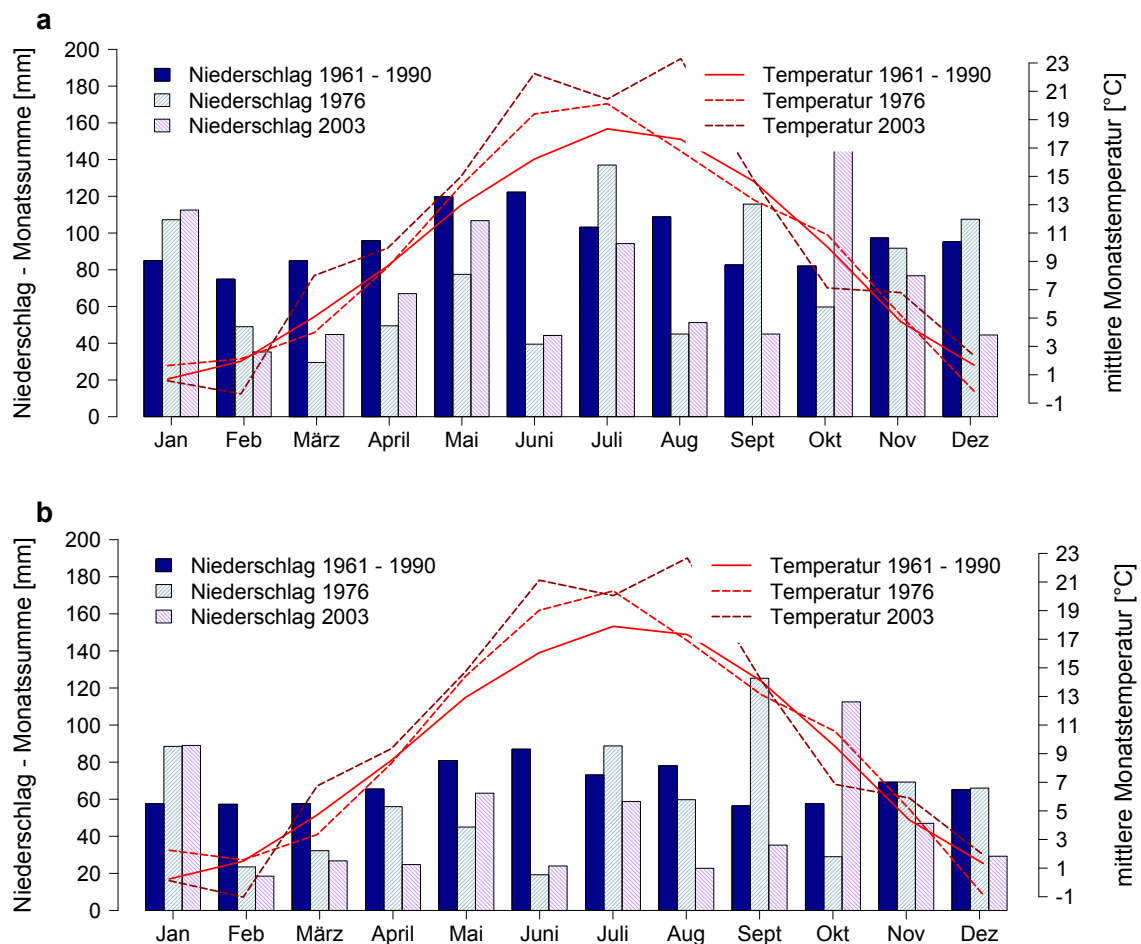


Abbildung 28: Die Witterung der Trockenjahre 1976 und 2003 im Vergleich zum Klima an den Untersuchungsstandorten im Schwarzwald (a, oben) und am Stromberg (b, unten)

In der Form der üblichen Klimadiagramme sind die monatlichen Niederschlagssummen als Balken und die mittleren Monatstemperaturen als Linien dargestellt. Der jeweils linke Balken stellt den Wert für die Klimanormale (1961-1990) dar, mittlerer und rechter schraffierter Balken zeigen die Werte in den Trockenjahren 1976 und 2003. Die durchgezogene Linie symbolisiert die Temperaturentwicklung im Jahresverlauf für die Klimanormale, die gestrichelten Linien stehen für die Trockenjahre 1976 und 2003. Datengrundlage für diese Grafik waren die Mittelwerte der DWD-Griddaten von den jeweils vier Untersuchungsstandorten in jeder Region.

In den Trockenjahren 1976 und 2003 fielen in beiden Untersuchungsregionen während der Vegetationszeit nur unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen und es herrschten überdurchschnittliche Temperaturen. 1976 konnte die Trockenheit durch etwas erhöhte Niederschläge im Juli in beiden Regionen abgemildert werden.

In Abbildung 28 wird anhand der aus dem Rasterdatennetz des Deutschen Wetterdienstes (DEUTSCHER WETTERDIENST, 15.11.2012) extrahierten Niederschlags- und Temperaturdaten in monatlicher Auflösung (Zeitraum: 1900 bis 2009) gezeigt, dass die beiden ausgewählten Jahre auch

an den Untersuchungsstandorten ausgeprägte Trockenjahre waren. Die mittlere Jahresniederschlagssumme der vier Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes beträgt in der Klimanormalperiode (1961-1990) 1152 mm und für die vier Standorte im Stromberg 806 mm. Die Jahresdurchschnittstemperatur liegt für die gleiche Periode an den vier Standorten im Schwarzwald bei durchschnittlich 9.4 °C, für den Stromberg bei 9.0 °C. Innerhalb der Vegetationsperiode (April-Sept) fielen an den vier Untersuchungsstandorten am Westabfall des Schwarzwaldes im Trockenjahr 1976 nur 73 % des langjährigen Mittel (464 mm versus 632 mm) und 2003 nur 65 %. Dafür lagen die mittleren Monatstemperaturen während der Vegetationszeit im Schwarzwald 1976 um 5 % und 2003 sogar um 19 % über dem langjährigen Mittel. Für die vier Untersuchungsstandorte im Stromberg betrug der mittlere Niederschlag in der Vegetationszeit des Trockenjahres 1976 394 mm, was 89 % des langjährigen Mittels in Höhe von 441 mm entspricht. Im Trockenjahr 2003 lag dieser Wert lediglich bei 229 mm, was nur noch 52 % (!) des langjährigen Mittels entspricht. Die Temperaturen während der Vegetationszeit waren in den Trockenjahren an den Standorten im Stromberg um ähnliche Größenordnungen erhöht wie im Schwarzwald.

In Abbildung 28 sind in beiden Regionen und beiden Trockenjahren die im Vergleich zur Klimanormalperiode (1961-1990) deutlich geringeren Niederschlagssummen in den Monaten Februar bis Juni, sowie im August zu erkennen. Im Vergleich der beiden Trockenjahre sind die monatlichen Niederschlagssummen 1976 in den Monaten April, Juli, August (nur Stromberg) und September höher als 2003. 2003 waren die Niederschläge im Mai etwas höher als 1976. Die Unterschiede der Monatssummen geben einen ersten Eindruck von der zeitlichen Entwicklung der Trockenheit innerhalb des jeweiligen Jahres wieder. Durch die unterschiedlichen Niederschlagsperioden innerhalb der Monate kann es jedoch zu ausgeglicheneren oder extremeren Verläufen der Wasserverfügbarkeit kommen. Bereits aus der monatlichen Analyse kann jedoch geschlossen werden, dass die Trockenheit 2003 insgesamt deutlich länger angehalten hat, als dies 1976 der Fall war. Auch bei den Temperaturen ist ein Unterschied zwischen den beiden Trockenjahren festzustellen: Während 1976 in den Untersuchungsregionen die mittleren Monatstemperaturen nur von Mai bis Juli über den Werten der Klimanormalperiode lagen, liegen 2003 die Werte für ein halbes Jahr (März bis August) über dem langjährigen Mittel.

Die dargestellten Ergebnisse entsprechen weitestgehend den Erkenntnissen von SCHINDLER UND MAYER (2007). Aus einem Vergleich der Niederschlagsdefizite in den beiden Trockenjahren an 16 ausgewählten und über ganz Baden-Württemberg verteilten Niederschlagsstationen folgern diese Autoren, „...dass die Witterung im Jahr 2003 im Vergleich zum Trockenjahr 1976 insgesamt als noch trockener zu beurteilen ist.“ (ebenda, S. 34).

4.1.2 Die Entwicklung der Witterung seit 1900

Abbildung 29 zeigt die langfristige Entwicklung der Niederschlagssumme in der Vegetationszeit (April bis Sept) für die beiden Untersuchungsregionen. Die Niederschlagssumme hat sich im Schwarzwald im Verlauf der betrachteten 110 Jahre (1900 bis 2009) kaum verändert, im Stromberg ist sie um ca. 20 mm leicht zurückgegangen. Deutlich wird auch das unterschiedliche Niveau der Niederschlagssummen in der Vegetationszeit in beiden Regionen. Über den gesamten Zeitraum hinweg sind es ca. 435 mm im Stromberg und ca. 625 mm im Schwarzwald. Trockene und feuchte Jahre stimmen in beiden Regionen weitestgehend überein. Bei der Betrachtung der Temperaturen in der Vegetationszeit zeigt sich im Gegensatz zu den Niederschlägen ein deutlicher Trend. In beiden Regionen ist die Temperatur in den vergangenen 110 Jahren um knapp 1°C angestiegen. Zwischen den beiden Temperaturkurven sind ab ca. 1980 und im Zeitraum von 1910 bis ca. 1920 kaum Niveauunterschiede auszumachen. Für das Winterhalbjahr (Oktober bis März, Daten nicht gezeigt) besteht in beiden Regionen hinsichtlich der Niederschlagssumme eine eindeutige Tendenz zur Zunahme. Dies beträgt ca. 90 mm für die vier Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes und ca. 70 mm für die vier Standorte im Stromberg. Die Wintertemperatur zeigt

dagegen einen ähnlichen Trend wie die Temperatur in der Vegetationszeit, also eine Erhöhung um ca. 1°C seit 1900.

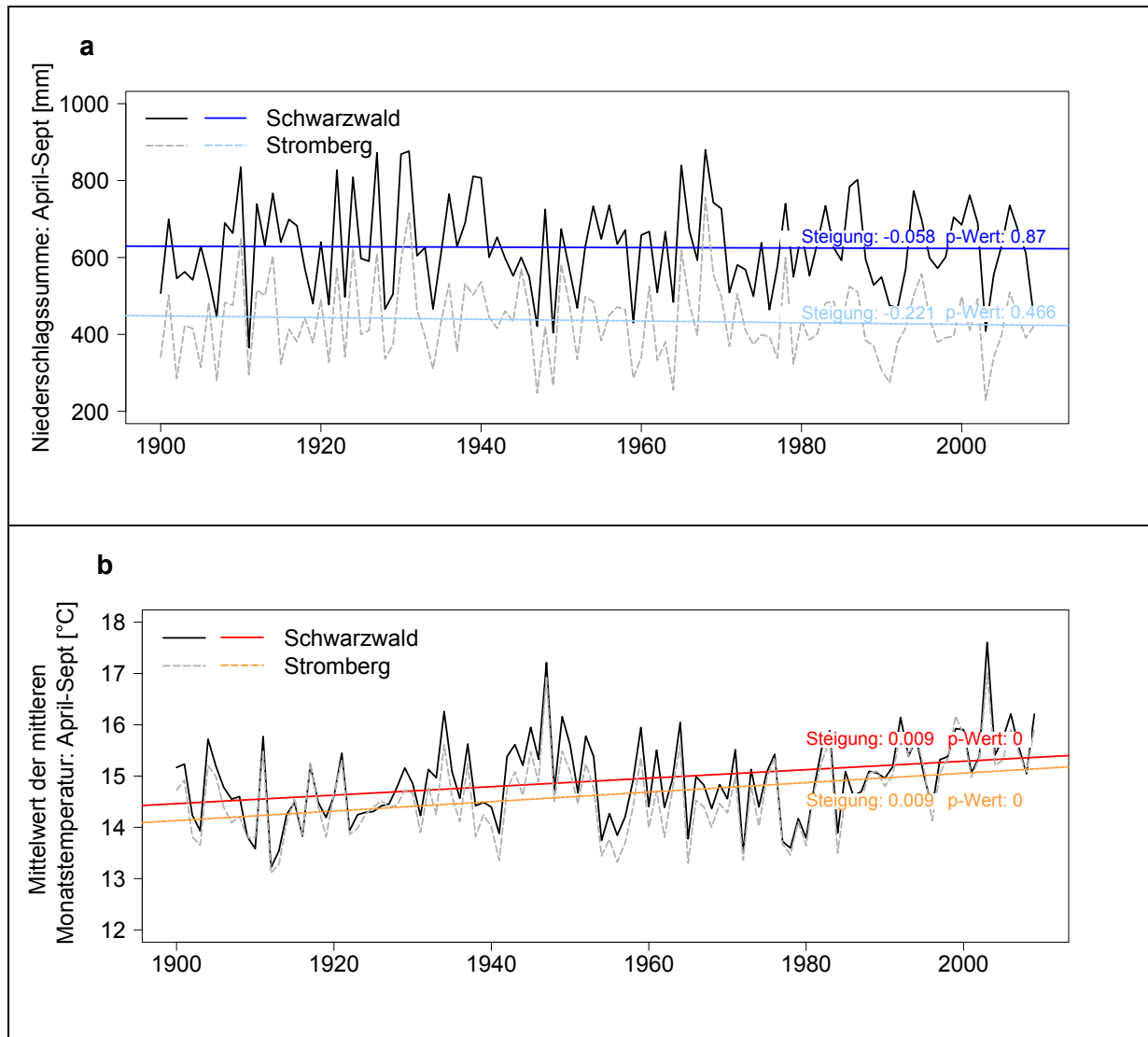


Abbildung 29: Entwicklung der Niederschlagssumme (a, oben) und der monatlichen Mitteltemperatur (b, unten) in den Untersuchungsregionen

Berechnungsgrundlage sind Niederschlagssumme und Monatstemperaturen in der Vegetationszeit (April-September) im Zeitraum 1900 bis 2009, Quelle: DWD-Grid-Daten.

Während sich die Niederschläge in den Untersuchungsregionen im Verlauf der letzten 110 Jahre kaum verändert haben, sind die Temperaturen in der Vegetationszeit signifikant angestiegen.

Diese Ergebnisse entsprechen den Resultaten aus anderen Analysen. So ist im Monitoringbericht 2011 des KLIWA-Projekts (ARBEITSKREIS KLIWA 2011a), bzw. im Ergänzungsbericht "Niederschlag" (ARBEITSKREIS KLIWA 2011c) nachzulesen, dass die Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr, d.h. von November bis April im Analysezeitraum 1931 bis 2010 in den Regionen R3 (Rhein unterhalb Wiese bis oberhalb Kinzig) und N3 (Enz) im Winterhalbjahr um ca. 12 % zugenommen haben. Für das hydrologische Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) zeigt der KLIWA-Bericht für die Region R3 keine Veränderung, für die Region N3 dagegen eine geringfügige Abnahme um ca. 3 %. Im Ergänzungsbericht „Temperatur“ (ARBEITSKREIS KLIWA 2011b) wird für die Großregionen „Hoch-/Oberrhein“ und „Neckar“ jeweils eine Temperaturerhöhung von ca. 1°C im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr des o.g. Analysezeitraumes festgestellt.

4.2 Ergebnisse aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell (LWF-BROOK-90)

4.2.1 Matrixpotenzialwerte in den Trockenjahren und danach

Der Verlauf der mittleren Matrixpotenzialwerte, berechnet aus den sechs Zeitreihen pro Standort, in den Jahren 1976 und 2003 ist beispielhaft für den Standort Attental in Abbildung 30 dargestellt. Hier und an allen anderen Standorten (Anhang 8) zeigt sich, dass die Trockenheit im Jahr 1976 durch Niederschläge im Juli abgeschwächt wurde (vgl. Abbildung 28), während 2003 erst Ende August die tiefsten Potenzialwerte erreicht wurden. 2003 hielt die Trockenperiode also deutlich länger an als 1976.

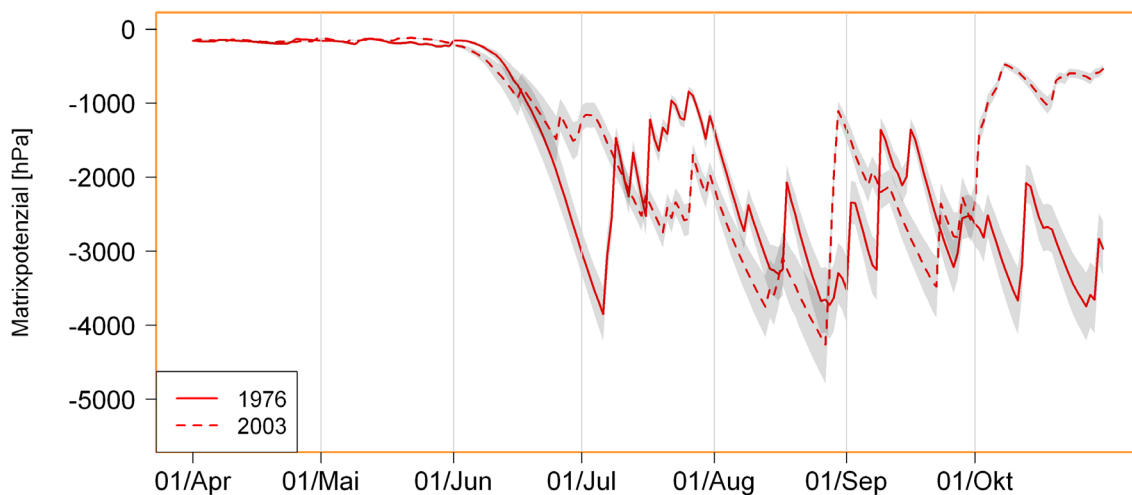


Abbildung 30: Verlauf der mittleren Matrixpotenzialwerte am Untersuchungsstandort Attental in den Trockenjahren 1976 und 2003

Der grauer hinterlegte Bereich stellt den Standardfehler der sechs Zeitreihen (drei Bodenprofile x zwei Baumarten) dar, Quelle: Simulation mit LWF-BROOK-90

Die Trockenheit 1976 wurde durch Niederschläge im Juli abgeschwächt. 2003 setzte die Trockenheit später ein und erreicht im August ihren Höhepunkt.

MAYER UND SCHINDLER (2007) kommen anhand der simulierten, relativen nutzbaren Bodenwasserkapazität auf der Basis von täglich verfügbaren Witterungsdaten zu einem ähnlichen Ergebnis für die von ihnen untersuchten 16 baden-württembergischen Klimastationen. In der Gegenüberstellung der beiden Trockenjahre zeigen sie, dass die Trockenheit 1976 ihren Schwerpunkt bereits Anfang Juli hatte, während 2003 erst Ende August die höchsten Trockenheitswerte berechnet wurden. Da der Beginn der Trockenheit in beiden Jahren kaum voneinander abgewichen habe, gehen sie von einer länger anhaltenden Trockenheit im Jahr 2003 aus.

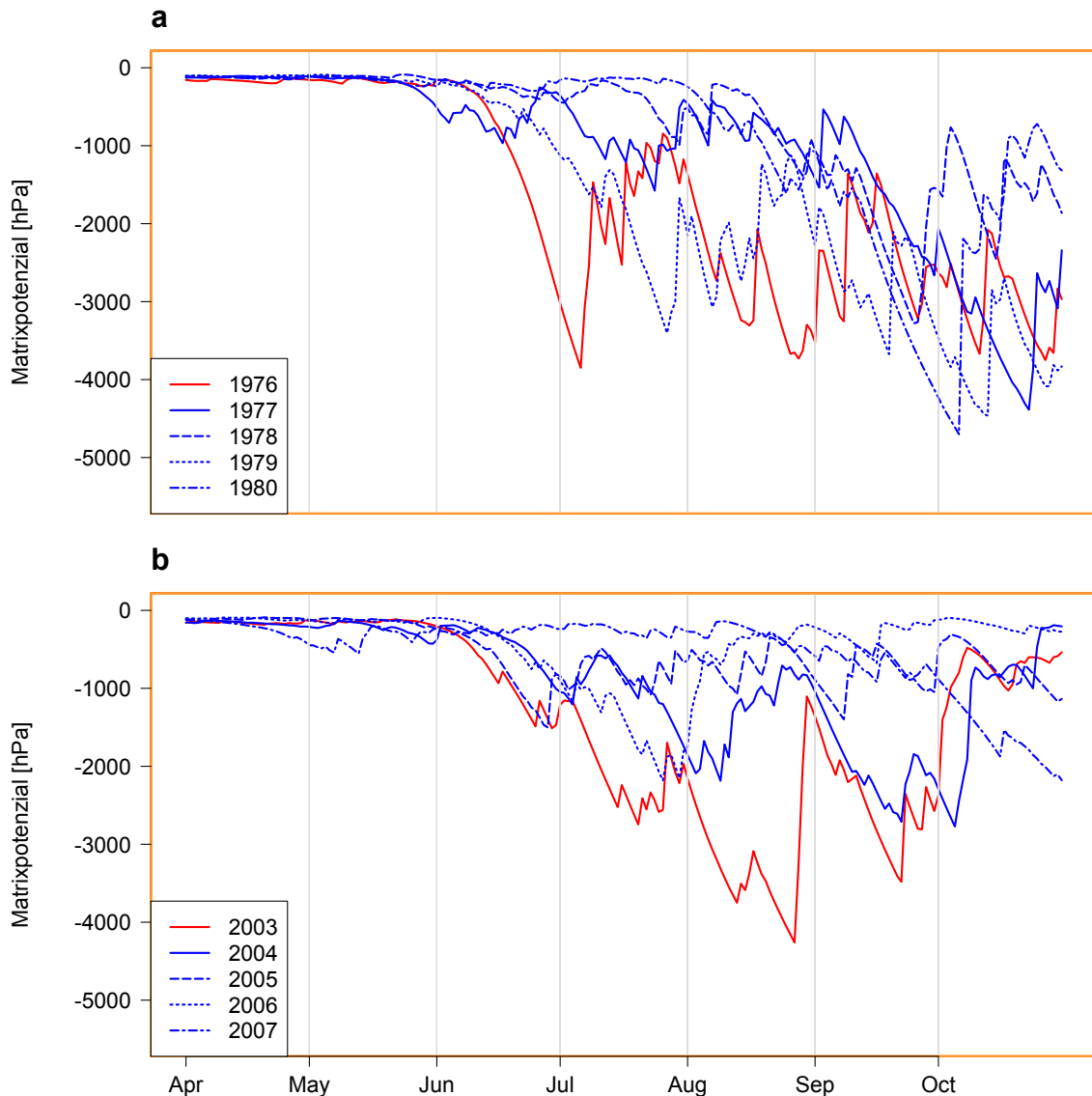


Abbildung 31: Verlauf der mittleren Matrixpotenzialwerte am Untersuchungsstandort Attental in den Trockenjahren 1976 (a: oben) und 2003 (b: unten) und den Folgejahren.

Dargestellt sind die Trockenjahre jeweils in roter Farbe und die vier darauffolgenden Jahre in blauer Farbe, Quelle: Simulation mit LWF-BROOK-90

Die beiden unmittelbaren Folgejahre nach der Trockenheit 1976 zeichnen sich in Attental durch eine sehr gute Wasserversorgung in der Vegetationszeit aus. Nach der Trockenheit 2003 ist die Wasserversorgung im Folgejahr 2004 zu Beginn der Wachstumsperiode noch gut, die folgenden Jahre zeigen in den Monaten Juni und Juli jedoch ebenfalls eine angespannte Wasserversorgung.

In Abbildung 31 ist der Verlauf der Matrixpotenzialwerte im Jahr 1976 (oben) und 2003 (unten), sowie in den folgenden vier Jahren beispielhaft für den Standort Attental dargestellt. Im Anhang 9 sind diese Grafiken für alle Standorte zu finden. Es wird deutlich, dass die Trockenfolgejahre nach 1976 in den für den Radialzuwachs wichtigen Zeiten (Mai bis Juli) durch deutlich weniger angespannte Matrixpotenzialwerte gekennzeichnet waren, während die Trockenfolgejahre nach 2003 bis auf das Jahr 2004 ebenfalls relativ niedrige Matrixpotenzialwerte im genannten Zeitraum zeigen.

Das Trockenjahr 2003 ist also im Vergleich zum Trockenjahr 1976 nicht nur durch eine länger anhaltende Dauer der Trockenheit, sondern auch durch einen angespannten Wasserhaushalt in den unmittelbaren Trockenfolgejahren gekennzeichnet. Diese Situation wird sich, so ist zu vermuten, auf die Erholungsreaktion der Bäume auswirken (vgl. Kapitel 4.7).

4.2.2 Relatives pflanzenverfügbares Wasser (REW-Werte) in den Trockenjahren

Abbildung 32 stellt den Verlauf der REW-Werte in den Trockenjahren 1976 und 2003 beispielhaft für den Standort Attental dar. Nach den Simulationen wird der kritische Schwellenwert von 0.4 am 21. Juni 1976 unterschritten, wobei Ende Juli die kritische Grenze fast wieder überschritten wird. 2003 wird der Grenzwert am 23. Juni unterschritten. 1976 wird an dem Standort auch im Verlauf des Oktobers der Wert von 0.4 nicht mehr überschritten, 2003 dagegen wird der Grenzwert bereits am 6. Oktober wieder überschritten. Die monatlich berechneten integrierten REW-Werte (REW_{int}) entsprechen in Abbildung 32 den Flächen zwischen der kritischen Grenze (gestrichelte rote Linie) und den Kurvenverläufen der REW-Werte (schwarze Linien).

Die Kurvenverläufe aller Standorte sind im Anhang 10 aufgeführt. Insgesamt zeigt sich ein sehr ähnliches Bild wie bei den Kurven der Matrixpotenzial-Werte (Anhang 8), wobei die Differenzierung zwischen den beiden Jahren beim Matrixpotenzial deutlicher hervortritt als bei den REW-Werten.

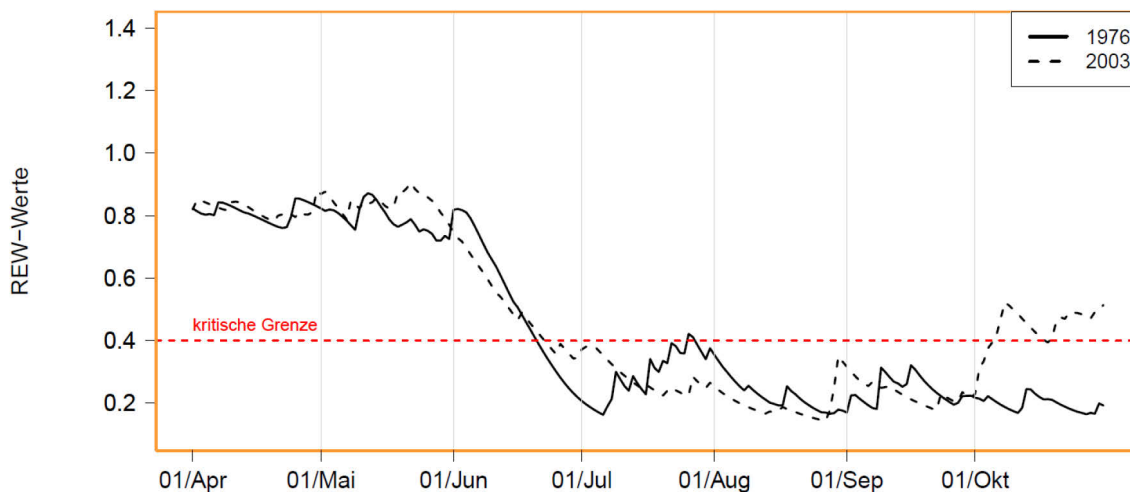


Abbildung 32: Verlauf der REW-Werte (relatives pflanzenverfügbares Wasser) am Untersuchungsstandort Attental in den Trockenjahren 1976 und 2003.

Die gestrichelte rote Linie stellt die von BREDÁ UND GRANIER (1996) ermittelte Grenze dar. Unterhalb dieser Grenze sank die Transpiration von Traubeneichen bei Nancy im Vergleich zur potenziellen Evapotranspiration deutlich ab. Quelle: eigene Berechnung und Simulation mit LWF-BROOK-90 (vgl. Kapitel: 3.3.8)

Die „kritische Grenze“ wird in Attental 2003 etwas später als 1976 erreicht. 1976 führen die Niederschläge im Juli zu einer kurzfristigen Erholung. Insgesamt ist die Differenzierung der beiden Trockenjahre anhand der REW-Werte geringer als anhand der Saugspannung.

4.3 Ergebnisse der genetischen Analyse der Eichen

4.3.1 Artzugehörigkeit

Abbildung 33 zeigt die Artzugehörigkeit der untersuchten Eichen, aufgrund der genetischen Analysen im Vergleich zu zwei im Rahmen des QREG-Projektes untersuchten Stiel-, bzw. Flaumeichenbeständen. Alle Bäume an den Untersuchungsstandorten wurden dabei eindeutig der Traubeneiche (blau) zugeordnet. Für die Untersuchungsstandorte im Schwarzwald (AT, SU, HW und LT) ist der höhere Stichprobenumfang mit 30 Bäumen pro Standort dargestellt. Ein Baum am Standort Attental (AT) und zwei Bäume am Standort Heuweiler (HW) wurden der Stieleiche zugeordnet, dieses waren jedoch keine Untersuchungsbäume für die Radialzuwachs- oder Höhenanalysen (vgl. Kapitel 3.1.4).

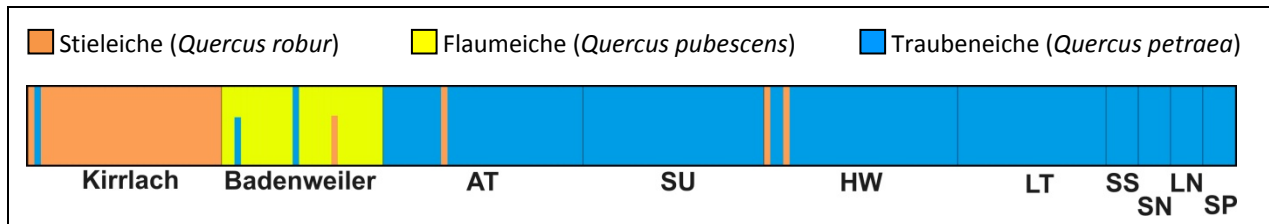


Abbildung 33: Artzugehörigkeit der Eichen an den Untersuchungsstandorten im Vergleich zu zwei Standorten die im Rahmen des QREG-Projektes untersucht wurden

Die Standorte des QREG-Projektes (Kirrlach und Badenweiler) sind durch Stiel- und Flaumeiche geprägt. Fast alle beprobte Bäume an den Untersuchungsstandorten dieser Arbeit (abgekürzt mit zwei Großbuchstaben) sind Traubeneichen.

Wenn im folgenden Text von der Eiche mit Bezug auf die Untersuchungsbäume gesprochen wird, ist also immer die Traubeneiche gemeint, auch wenn die Art nicht ausdrücklich erwähnt wird.

4.3.2 Eiszeitliches Refugialgebiet

Bis auf wenige Ausnahmen gehören fast alle in dieser Arbeit untersuchten Eichen bezüglich des eiszeitlichen Refugialgebiets zur balkanischen Linie. Ausnahmen sind: Eiche-Nr. 1 am Standort Heuweiler (HW): iberische Herkunftslinie und Eiche-Nr. 3 am Standort Sternenfels-Nordhang (SN): italienische Herkunftslinie. Alle Eichen vom Standort Sulzburg gehören ebenfalls zur italienischen Herkunftslinie. Abbildung 34 zeigt eine Karte, welche alle im Rahmen des QREG-Projektes untersuchten Eichenbestände darstellt. Es wird deutlich, dass sich die Rückwanderungswege im Bereich des Oberrheingraben offensichtlich kreuzten oder unterschiedliche Wege in unterschiedlicher zeitlicher Reihenfolge dominiert haben. Die überwiegende Mehrheit der analysierten Bäume passt mit dem großräumigen Muster zusammen, was für den autochthonen Ursprung der Bestände spricht. Bei den beiden Individuen, die nicht zur Herkunft der übrigen analysierten Bäume des Bestandes passen, könnte die Wahrscheinlichkeit etwas höher sein, dass sie nicht autochthonen Ursprungs sind, also beispielsweise eine Vermischung von Saatgut in der Pflanzschule erfolgte. Allerdings sind diese Chloroplasten-DNA-Haplotypen an anderen Orten in der Region vorhanden. Ein zufälliges Migrationsereignis durch einen Eichelhäher aber auch die Vermischung von Saatgut unterschiedlicher Bestände könnte solche „Ausnahmen“ erklären.

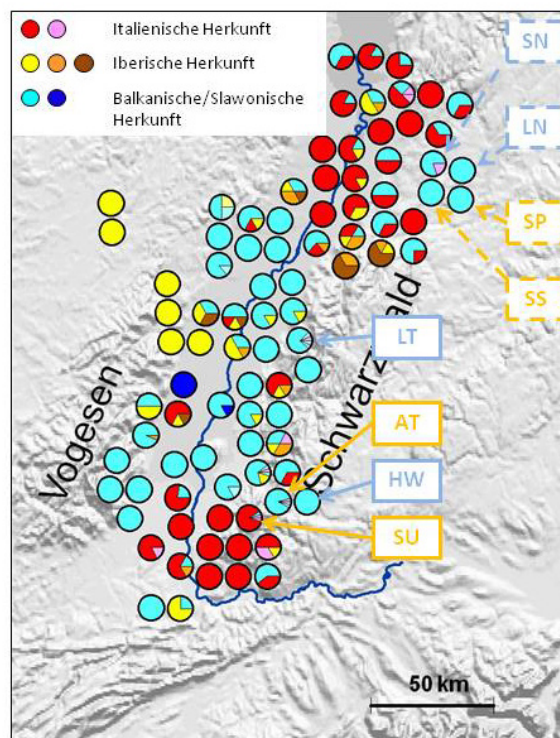


Abbildung 34: Karte zur der Darstellung der eiszeitlichen Refugialgebiete der Untersuchungsbestände sowie aller im Rahmen des QREG-Projektes untersuchten Eichenbestände

4.4 Ergebnisse zum Höhenzuwachs und Höhenwachstum

4.4.1 Trockenstress-Reaktionen im Höhenzuwachs

Es zeigt sich, dass die rekonstruierten jährlichen Höhenzuwächse selbst innerhalb derselben Baumart an einem Standort sehr heterogen sein können. So schwankt die mittlere Interserienkorrelation der im Detail analysierten 20 Jahre (1972 bis 1981 und 1999 bis 2008) für die fünf Bäume zwischen 0.18 (Buchen am Standort Leonbronn) und 0.75 (Buchen am Standort Sulzburg) und liegt im Mittel der acht Kollektive, also der vier Höhenzuwachsserien der Buchen und vier der Eichen, bei 0.49. Nur eine mittlere Interserienkorrelation, die der Buchen von Sulzburg, ist statistisch signifikant ($p < 0.05$). Im Vergleich dazu liegt die mittleren Interserienkorrelation der Radialzuwächse im selben Zeitraum für die acht Kollektive bei 0.57, wobei hier drei mittleren Interserienkorrelationen statistisch signifikant sind ($p < 0.05$).

Es sind die folgenden Muster bei den in Abbildung 35 dargestellten Höhenzuwächsen zu erkennen: Der Höhenzuwachs beider Baumarten lag um das Jahr 1976, im Mittel waren die Bäume damals 27 Jahre alt, auf einem deutlich höheren Niveau, als um das Jahr 2003 als die Bäume im Schnitt 54 Jahre alt waren (vgl. Niveau der Kurven in Abbildung 35a und b). Auch deutliche Unterschiede zwischen den Baumarten fallen auf. So erreichen die Buchen über alle vier Standorte hinweg im Trockenjahr 1976 den absolut höchsten mittleren jährlichen Höhenzuwachs des Betrachtungszeitraums (1972 - 1981) von 56.3 ± 31.2 cm (Mittelwert \pm Standardabweichung). Auch das Trockenjahr 2003 fällt bei den Buchen im Betrachtungszeitraum 1999 bis 2008 mit einem ungewöhnlich hohen Wert von 40.6 ± 14.0 cm auf. Die Traubeneichen erreichen dagegen 1976 im Mittel über alle Standorte lediglich Werte von 31.2 ± 14.3 cm und 2003 von 21.1 ± 10.5 cm. In den drei Trockenfolgejahren (1977 - 1979) erreichen die Buchen im Mittel 43.6 ± 19.1 cm, die Traubeneichen liegen mit 44.2 ± 21.9 cm fast auf demselben Niveau. In den Trockenfolgejahren 2004 bis 2006 leisten die Buchen einen mittleren Höhenzuwachs von 16.8 ± 9.5 cm, die Traubeneichen dagegen 25.5 ± 18.0 cm.

Für beide Trockenjahre gilt, dass die Buchen im Schwarzwald im Trockenjahr einen ungewöhnlich starken Höhenzuwachs zeigen, im unmittelbaren Trockenfolgejahr der Höhenzuwachs dagegen zurückgeht. Die Traubeneichen im Schwarzwald zeigen dagegen in den beiden Trockenjahren 1976 und 2003 einen verhältnismäßig niedrigen Höhenzuwachs und im unmittelbaren Trockenfolgejahr - im Gegensatz zur Buche - keine Wachstumsrückgänge und damit keine erkennbare Stressreaktion. Sie liegen deshalb bei einer Betrachtung der drei Trockenfolgejahre, d.h. wenn die Stress- und Erholungsreaktion betrachtet wird, geringfügig über den Buchen. Die Zuwachsverläufe am trockensten Standort (Südhang im Stromberg: Spielberg) weichen von diesem Muster ab. Hier verlaufen die Mittelwertkurven der beiden Baumarten um das Jahr 1976 auffällig synchron. Nach 2003 zeigt sich am Standort Spielberg (SP) ebenso wie in Leonbronn (LN, Nordhang im Stromberg) jedoch wieder ein ähnliches Muster wie bei den Beständen im Schwarzwald: hohe Zuwächse der Buche, niedrige bei der Traubeneiche im Trockenjahr, umgekehrte Verhältnisse im Trockenfolgejahr. Die Höhenzuwachsunterschiede zwischen den Baumarten sind allerdings nur in einzelnen Fällen signifikant.

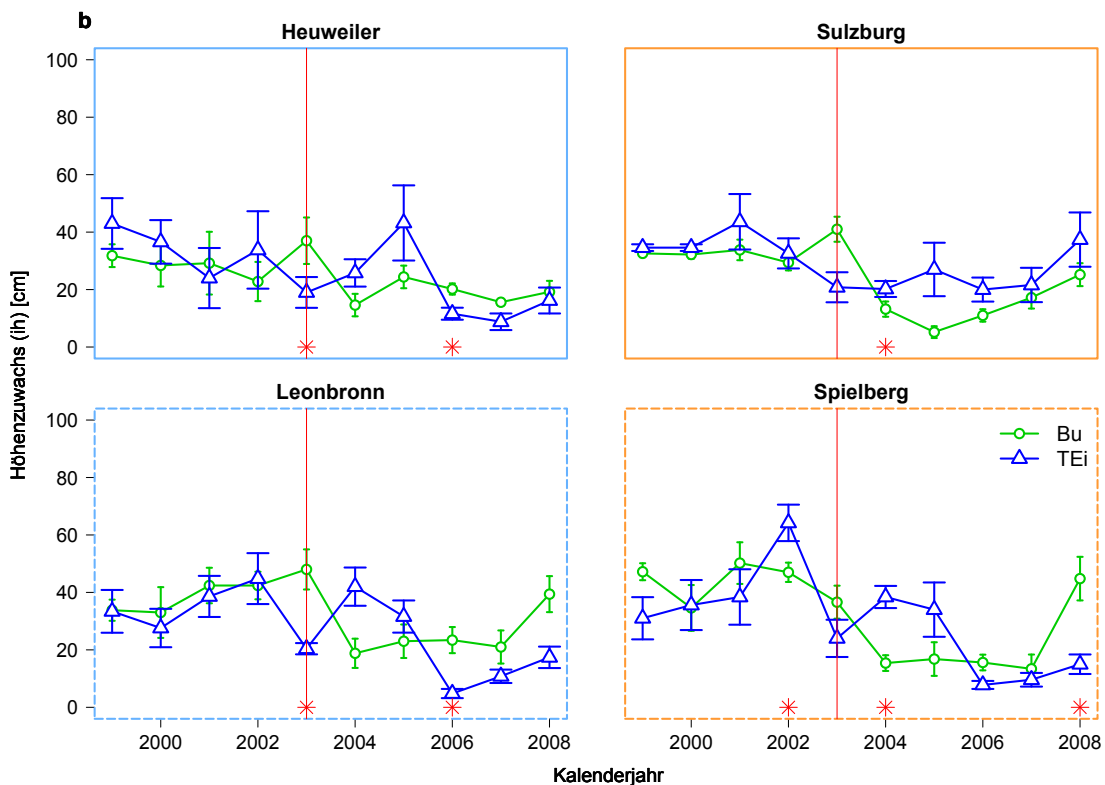
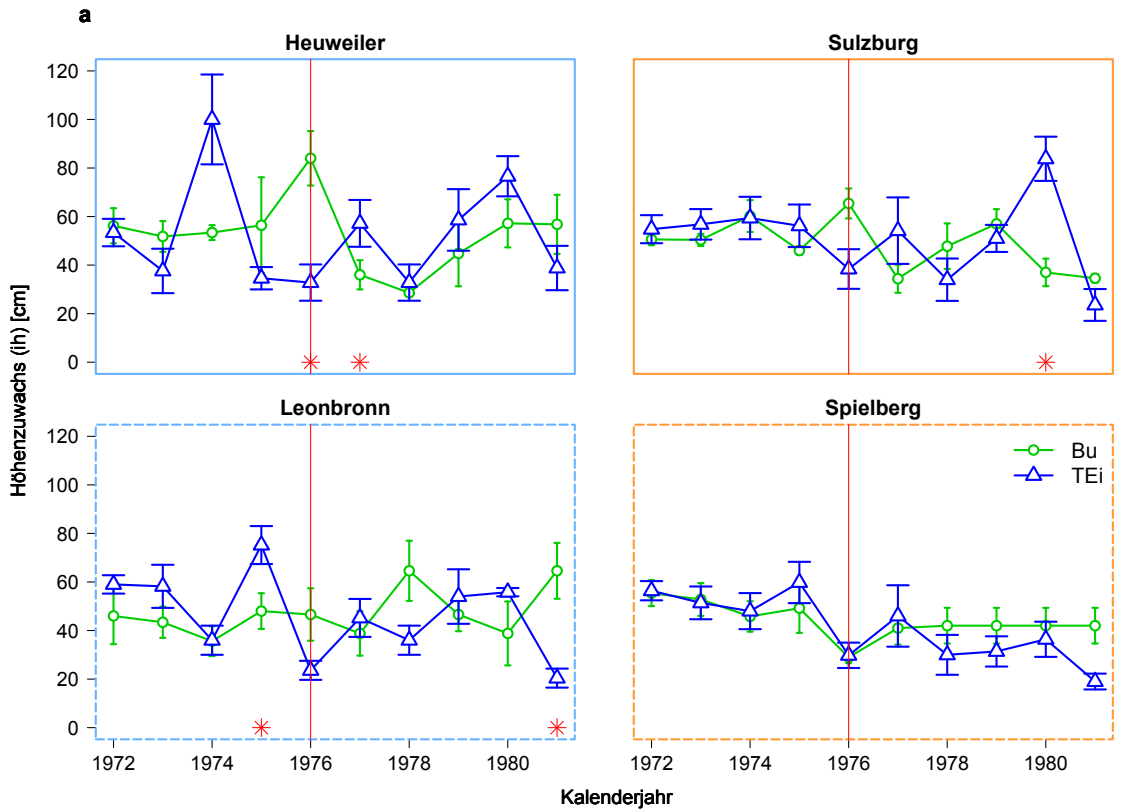


Abbildung 35: Mittlere jährliche Höhenzuwächse von Buche (Bu) und Eiche (Ei) um die Trockenjahre 1976 (a, oben) und 2003 (b, unten)

Die Fehlerbalken zeigen den Bereich des Standardfehlers. Signifikante Unterschiede zwischen Bu und TEi in einzelnen Jahren (p -Werte $< 0,05$) sind mit Sternchen gekennzeichnet. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale rote Linien gekennzeichnet. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Das Höhenwachsenniveau der untersuchten Bäume ist 1976 insgesamt noch deutlich höher als 2003. Die Buche hat, bis auf den trockensten Standort Spielberg, im jeweiligen Trockenjahr den größten Höhenzuwachs und sinkt im Trockenfolgejahr kurzfristig unter das Niveau der Eiche.

4.4.2 Trockenstress-Reaktionen im Höhenwachstum

4.4.2.1 Höhenwachstum von Buchen und Eichen im Vergleich

Die Analyse der Höhenwachstumskurven (Abbildung 36, Beispiel für Leonbronn) zeigt, dass - obwohl ausschließlich vorherrschende und nahezu gleich alte Bäume ausgewählt wurden - vor allem die Buchen unterschiedliche Höhenwachstumsverläufe aufweisen. So betrug bei den Buchen in Leonbronn der Höhenunterschied zwischen Baum 3 und Baum 5 im Jahr 1990 beispielsweise mehr als 6.5 m - 2010 betrug dieser Unterschied nur noch etwas mehr als 2 m. Im Anhang 11 sind die anhand der Stammanalysen und Triebbasisnarben rekonstruierten Höhenwachstumsverläufe aller Untersuchungsbäume an den jeweiligen Standorten getrennt für Buchen und Eichen dargestellt. Vor allem die ältesten Bestände (LT und SS) zeigen größere Unterschiede im Wachstumsverlauf der Untersuchungsbäume einer Standort-Baumarten-Kombination und den erreichten Endhöhen. Auch wenn der Höhenwachstumsverlauf anstatt über dem Jahr über dem Alter aufgetragen wird (nicht gezeigt), bleiben diese Unterschiede bestehen. In der weiteren Analyse erfolgt deshalb bezüglich des Höhenwachstums eine Konzentration auf die Jungbestände.

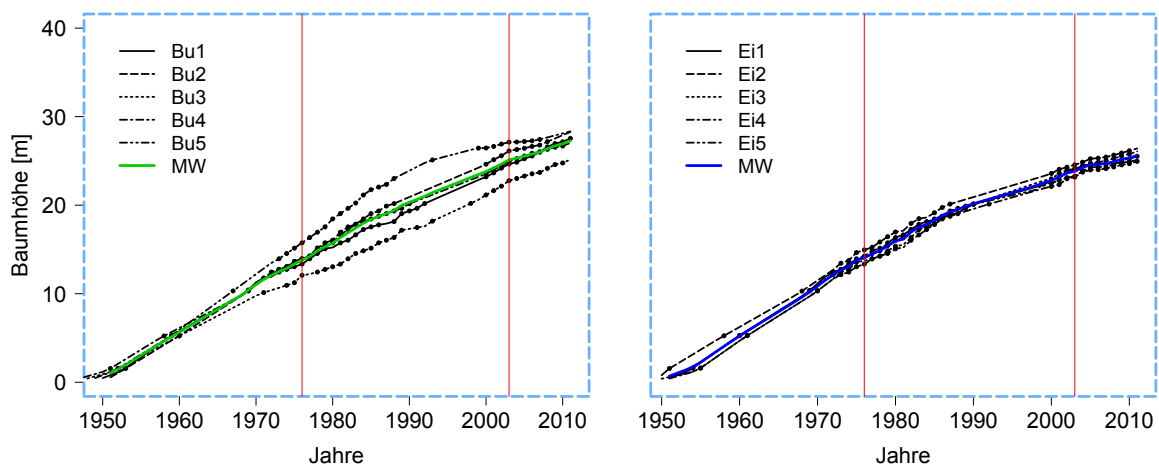


Abbildung 36: Höhenwachstumsgang der Einzelbäume am Standort Leonbronn (Nordhang - Stromberg), links (a) die Buchen, rechts (b) die Eichen

Der Höhenwachstumsverläufe der Einzelbäume sind schwarz dargestellt, die Mittelwerte jeweils farbig. Anhand von Triebbasisnarben oder Kronenscheiben nachgewiesene Höhenzuwächse (siehe Kapitel 3.2.4) sind mit schwarzen Punkten auf der jeweiligen Wachstumskurve gekennzeichnet. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale rote Linien gekennzeichnet.

Die Höhenwachstumsverläufe der untersuchten Buchen sind am Standort Leonbronn deutlich unterschiedlicher als die der Eichen.

4.4.2.2 Vergleich des Höhenwachstums mit dem ausgeglichenen „Normalwachstum“

Beispielhaft für die Buchen am Standort Leonbronn zeigt Abbildung 37 die sehr gute Übereinstimmung zwischen den modellierten Höhenwachstumskurven und den Messwerten. Die hohe Anpassungsgüte der einzelbaumweise angepassten Modelle wird durch die hohen Bestimmtheitsmaße bestätigt, welches für alle 40 Untersuchungsbäume (nur Jungbestände) im Mittel bei 0.919 liegt (min: 0.895, max: 0.946, $p < 0.0001$).

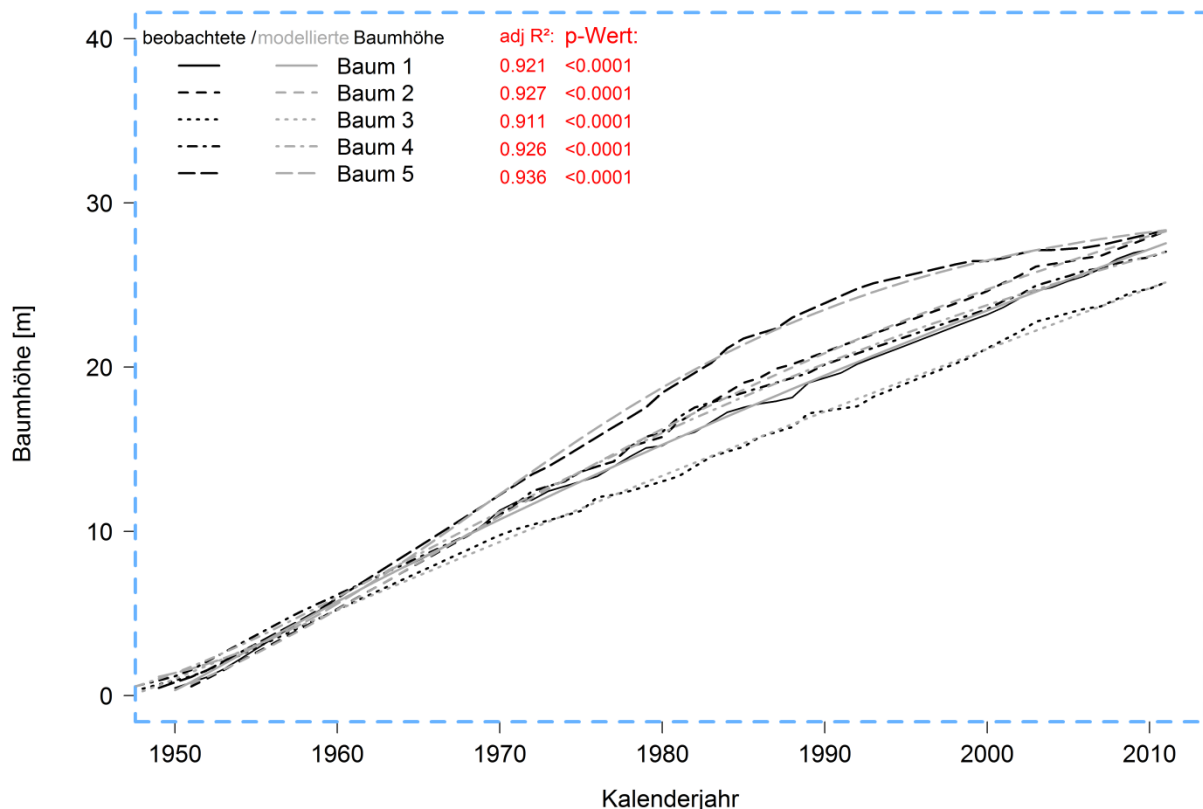


Abbildung 37: Gemessener (schwarz) und einzelbaumweise modellierter (grau) Höhenwachstumsgang der untersuchten Buchen am Standort Leonbronn (Nordhang - Stromberg)

Beobachteter und modellierter Höhenwachstumsverlauf liegen eng beieinander. Nach den Trockenjahren (1976 und 2003) sind keine auffälligen Abweichungen des beobachteten vom modellierten Höhenwachstum zu erkennen.

Die berechneten Quotienten aus beobachteter und modellierter Höhe sind in einem Zeitfenster von zehn Jahren um die Trockenjahre in Abbildung 38 dargestellt. Für die beiden Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes (Sulzburg und Heuweiler) und für den Nordhang am Stromberg (Leonbronn) ist - mit Ausnahme der Traubeneichen am Standort Heuweiler nach 1976 - nach den Trockenjahren 1976 und 2003 kein deutliches Absinken des Höhenzuwachses im Vergleich zur Referenzkurve erkennbar. Dagegen ist am Standort Spielberg (Südhang am Stromberg) nach dem Trockenjahr 1976 und auch nach 2003 eine deutliche Reduktion der Höhenindices beider Baumarten erkennbar. Diese weichen jedoch erst fünf Jahre nach dem Trockenereignis signifikant vom „normalen“ Höhenwachstum ab, wobei 1981 nur die Eiche, 2008 beide Baumarten einen signifikant von 1.0 abweichenden Höhenwachstumsindex aufweisen.

Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Baumarten treten kaum auf, Ausnahmen stellen das Trockenjahr 2003 in Sulzburg und das Trockenjahr 1976 in Heuweiler dar. In diesen beiden Fällen liegt der Quotient der Buchen signifikant über dem der Eichen.

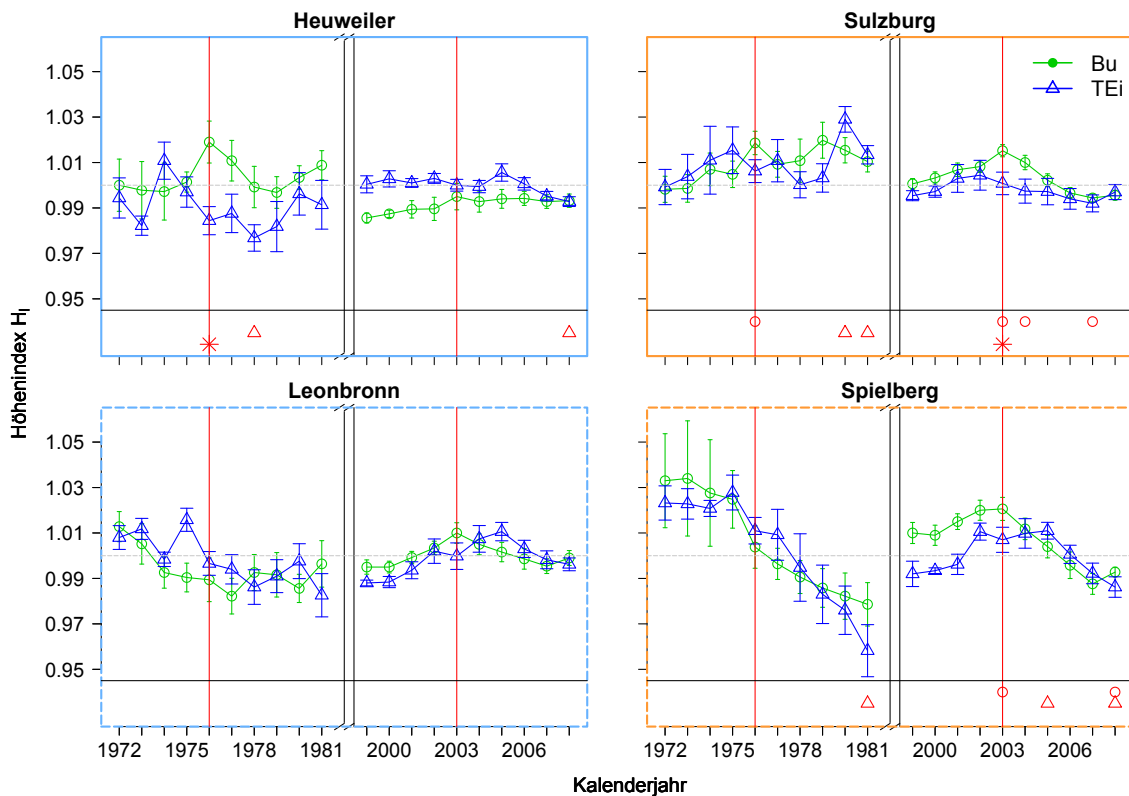


Abbildung 38: Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der mittleren Quotienten aus beobachteten Höhen zu modellierten Höhen von Buche (Bu) und Eiche (Ei)

Dargestellt sind für jeden Standort die zeitlichen Verläufe in den Zeiträumen 1972 bis 1981 (jeweils linke Seite im Teildiagramm) und 2000 bis 2008 (rechte Seite). Die Fehlerbalken zeigen den Bereich des Standardfehlers (breitere Enden bei den Fehlerbalken der Ei). Ergebnisse des Signifikanztests (p -Werte < 0.05) in bzw. nach den Trockenjahren sind für Bu mit Kreisen für Ei mit Dreiecken dargestellt. Signifikante Unterschiede zwischen Bu und Ei im und nach den Trockenjahren sind mit Sternchen gekennzeichnet. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale rote Linien gekennzeichnet. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Die Quotienten sinken nur am Standort Spielberg nach den Trockenjahren 1976 und 2003 deutlich ab. Die Unterschiede zwischen Buchen und Eichen sind insgesamt gering.

4.5 Ergebnisse zum Radialzuwachs

4.5.1 Radialzuwachsreihen von Buchen und Eichen im Vergleich

4.5.1.1 Alle Untersuchungsstandorte

Abbildung 39 stellt den mittleren Radialzuwachs in 1.3 m Höhe von allen Buchen und Eichen im gemeinsamen Überlappungszeitraum 1962 bis 2010 dar. Im direkten Vergleich zwischen Buchen und Eichen fällt auf, dass beide gemittelten Radialzuwachsreihen auffallend synchron verlaufen. Im Trockenjahr 1976 erfolgt ein fast identischer Einbruch beider Baumarten und eine sehr ähnliche Erholungsreaktion bis zum Jahr 1980. Speziell in diesem Jahr zeigen Buchen und Eichen gegenläufige Tendenzen. Auch nach dem Trockenjahr 2003 sind die Unterschiede zwischen den Baumarten relativ gering. Die Buche sinkt im Trockenfolgejahr 2004 noch etwas weiter ab, die Eiche erreicht ihren Tiefpunkt erst im nachfolgenden Jahr (2005). Auch die höhere Sensitivität der Buche wird aus den beiden Kurven deutlich, da diese deutlichere Ausschläge nach oben und unten zeigt. Besonders in den Jahren 1987 und 1997 hebt sich die Buche durch schnelleres Wachstum von der Eiche ab.

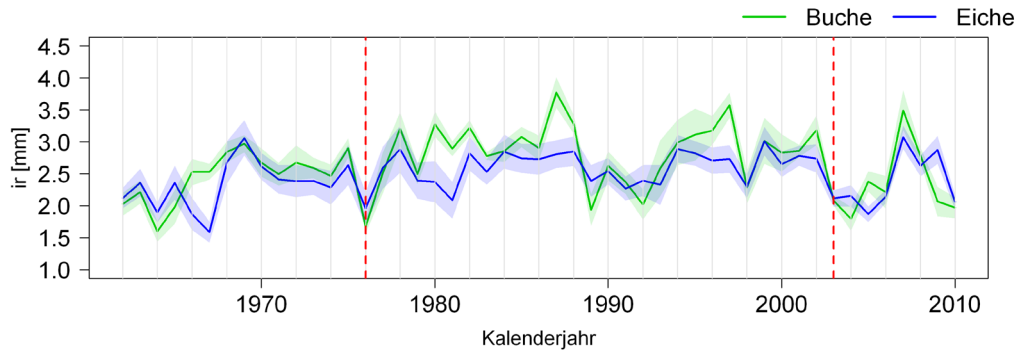


Abbildung 39: Mittlere Radialzuwachsreihen (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der untersuchten Buchen und Eichen von allen Standorten

Jede Kurve stellt den Mittelwert von acht Radialzuwachsreihen dar (pro Untersuchungsstandort eine Serie). Die transparenten Flächen stellen den Bereich des Standardfehlers dar. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale gestrichelte rote Linien gekennzeichnet.

Die Mittelwerte der Radialzuwachsreihen aller untersuchten Buchen und Eichen verlaufen auch nach den Trockenjahren auffallend synchron. Auffällige entgegengesetzte Wachstumsverläufe der beiden Baumarten, die den Bereich des Standardfehlers überschreiten, zeigen sich 1965/66 und 1979/80.

4.5.1.2 Getrennt nach Alt- und Jungbeständen

Abbildung 40 stellt den Mittelwert der untersuchten Buchen und Eichen getrennt nach Alt- (oben, a) und Jungbeständen (unten, b) dar. Die Kurven der Altbestände liegen im gemeinsamen Überlappungszeitraum unter dem Niveau der Jungbestände. Wieder fällt der fast synchrone Verlauf der beiden Kurven in beiden Kollektiven auf. Bei den Altbeständen liegen die Eichen ab ca. 1990 exakt auf dem Niveau der Buchen, davor etwas darunter.

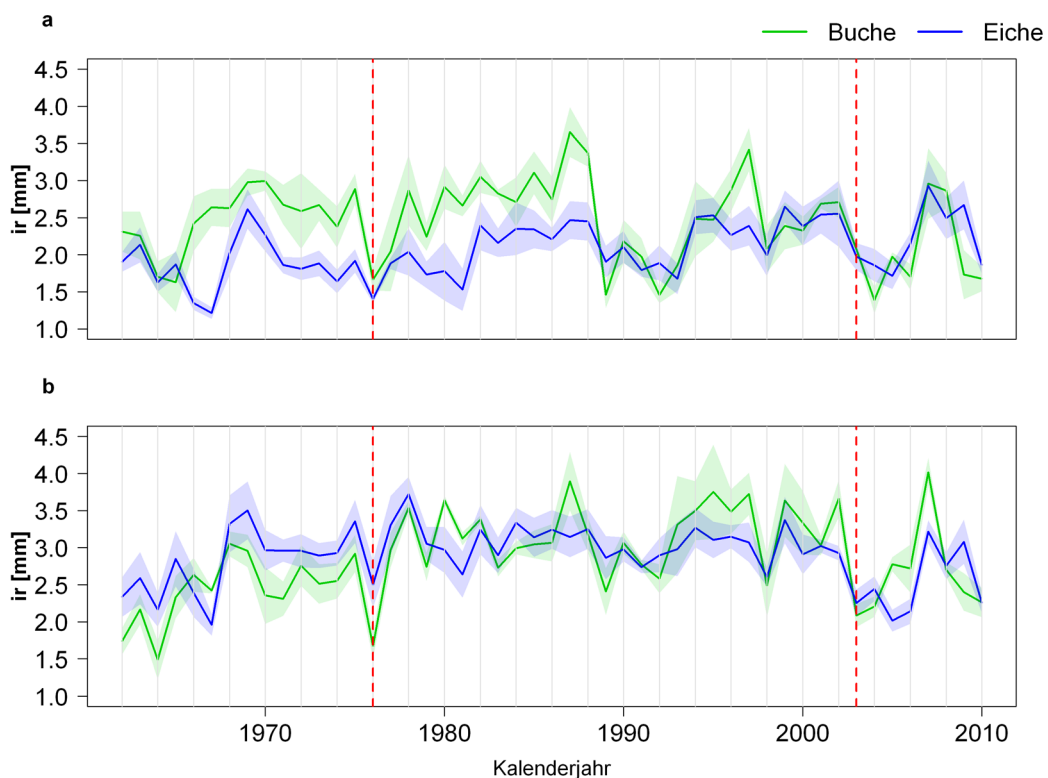


Abbildung 40: Mittlere Radialzuwachsreihen (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der Buchen und Eichen von den untersuchten Altbestände (a, oben) und von den untersuchten Jungbeständen (b, unten)

Jede Kurve stellt den Mittelwert von vier Radialzuwachsreihen dar, da jedes Alterskollektiv mit vier Untersuchungsstandorten vertreten ist. Die transparenten Flächen stellen den Bereich des Standardfehlers dar. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale gestrichelte rote Linien gekennzeichnet.

Die Auftrennung der Radialzuwachsreihen in Alt- und Jungbestände zeigt wieder einen weitgehend synchronen Verlauf der Zuwächse von Buchen und Eichen, wobei die Buchenzuwächse stärker von Jahr zu Jahr schwanken.

Im Trockenjahr 1976 verzeichnen beide Baumarten und Alterskollektive einen unmittelbaren Zuwachseinbruch. Im Trockenjahr 2003 ist ein verzögerter Radialzuwachsrückgang deutlicher bei den Altbeständen als bei den Jungbeständen zu beobachten. Die beiden für die Buche zuwachskräftigen Jahre 1987 und 1997 sind im Kollektiv der Altbestände noch stärker ausgeprägt als in den Jungbeständen.

4.5.1.3 Getrennt für die beiden Untersuchungsregionen

Im Vergleich der beiden Untersuchungsregionen (Abbildung 41) fällt zunächst auf, dass die Mittelwertkurven von Buchen und Eichen aus dem Schwarzwald (a, oben) gleichgerichteter verlaufen als diejenigen der Bäume vom Stromberg (b, unten). Die bereits in Abbildung 39 festgestellte entgegengesetzte Steigung der Kurven von Buchen und Eichen im Jahr 1980 ist offensichtlich auf die Bestände im Stromberg (Abbildung 41b) zurückzuführen, sie tritt im Schwarzwald (Abbildung 41a) nicht auf. In beiden Regionen verlaufen die Zuwachseinbrüche und Erholungsphasen von Buchen und Eichen in bzw. nach den Trockenjahren ähnlich. Im Trockenjahr 1976 fällt bei den Buchen im Schwarzwald auf, dass sie vor dem Stressereignis ein höheres Niveau als die Eichen aufweisen und dieses höhere Niveau auch nach dem Stressereignis wieder erreichen. Im Stromberg liegen Buchen und Eichen vor und nach dem Stressereignis 1976 dagegen auf gleicher Höhe. In beiden Regionen zeigt die Buche in den Jahre 1987 und 1997 besonders hohe Radialzuwächse.

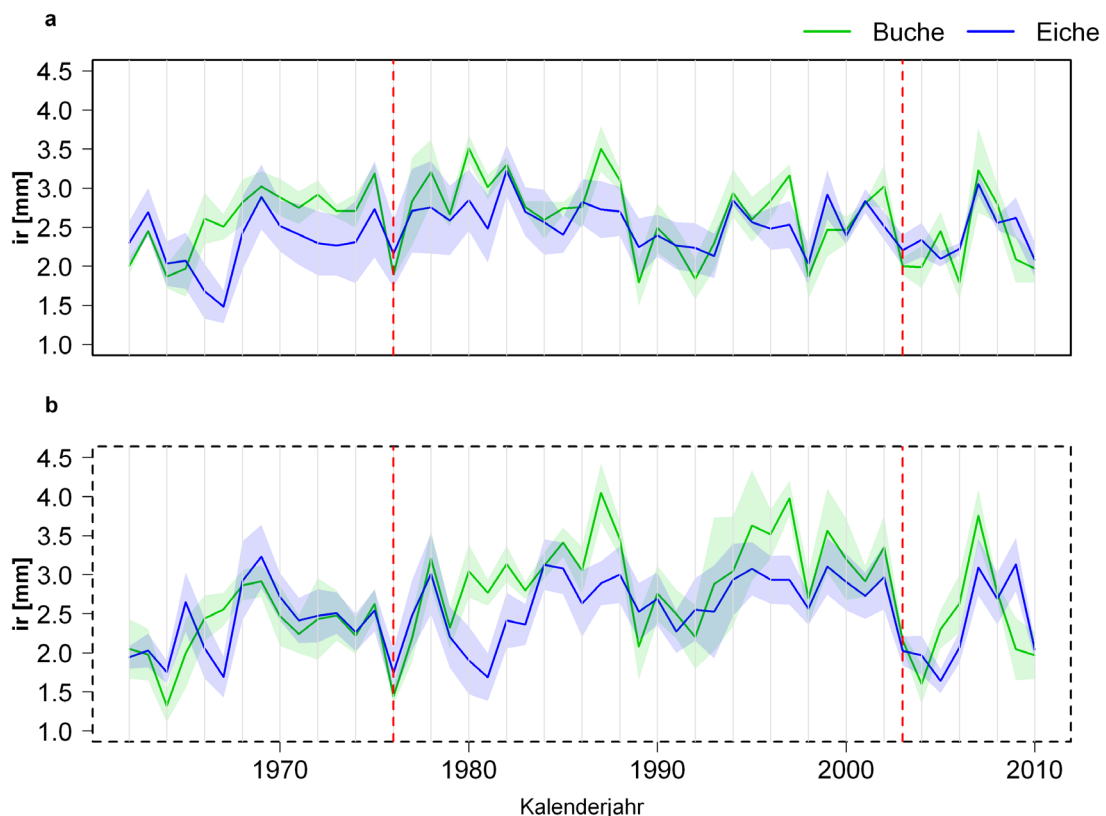


Abbildung 41: Mittlere Radialzuwachsserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der Buchen und Eichen aus den Untersuchungsregionen „Westabfall des Schwarzwaldes“ (a, oben) und Stromberg (b, unten)

Jede Kurve stellt den Mittelwert von vier Radialzuwachsserien dar, da jede Region mit vier Untersuchungsstandorten vertreten ist. Die transparenten Flächen stellen den Bereich des Standardfehlers dar. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale gestrichelte rote Linien gekennzeichnet.

In den beiden Untersuchungsregionen verlaufen die Radialzuwachsserien von Buchen und Eichen weitestgehend synchron. Der entgegengesetzte Zuwachsverlauf in den Jahren 1979/1980 ist nur in der Region Stromberg vorhanden.

4.5.1.4 Getrennt für Nord- und Südhänge

Im Vergleich der Radialzuwächse von Buchen und Eichen auf den unterschiedlich exponierten Hängen fällt in beiden Trockenjahren der etwas stärkere Zuwachseinbruch bei den nordexponierten Bäumen auf. Von den zuwachsstarken Jahren 1987 und 1997 scheinen dagegen die Buchen auf den Südhängen mehr profitiert zu haben als die auf den Nordhängen, wobei die Buchen auf den Nordhängen zwischen 1994 und 1997 eine besonders stark ausgeprägte „Hochphase“ erlebt haben.

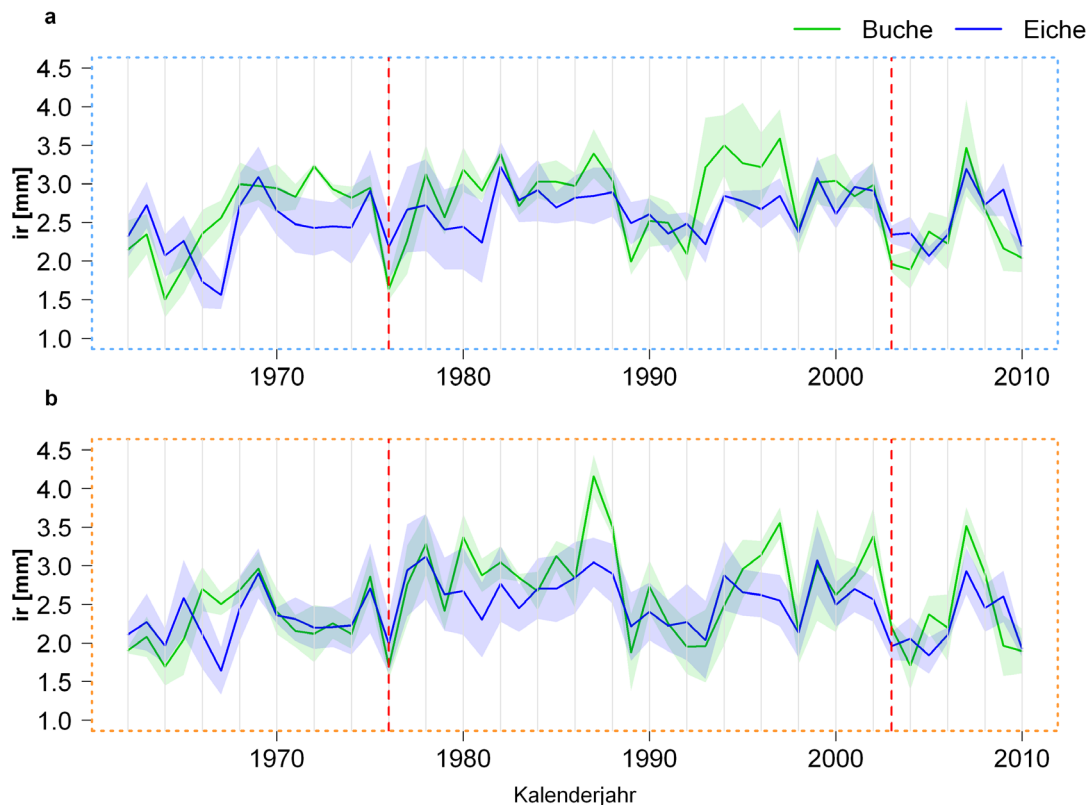


Abbildung 42: Mittlere Radialzuwachsserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der Buchen und Eichen von den nord(-ost) exponierten Hänge (a, oben) und von den süd(west) exponierten Hängen (b, unten)

Jede Kurve stellt den Mittelwert von vier Radialzuwachsserien dar, da jede Exposition mit vier Untersuchungsstandorten vertreten ist. Die transparenten Flächen stellen den Bereich des Standardfehlers dar. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale gestrichelte rote Linien gekennzeichnet.

Der synchrone Radialzuwachsverlauf von Buchen und Eichen zeigt sich auch bei der Aufteilung in Nord- und Südhänge. Auf den Südhängen zeigt die Buche 1987 einen außergewöhnlich hohen Radialzuwachs.

4.5.2 Darstellung der Radialzuwachsserien in unterschiedlichen Stammhöhen

In Abbildung 43 sind die Mittelwerte der Radialzuwachsserien (Absolutwerte) für Buche und Eiche getrennt nach Alt- und Jungbeständen und für die unterschiedlichen Entnahmehöhen der Stammscheiben dargestellt. Die Radialzuwächse verlaufen in den unterschiedlichen Stammhöhen gleichgerichtet. Bei den Altbeständen fällt auf, dass die Radialzuwächse der höheren Stammscheiben zum Ende des Betrachtungszeitraumes hin immer deutlich unter denen der Scheiben aus 1.3 m Höhe liegen, wobei die höchsten Scheiben den niedrigsten Radialzuwachs verzeichnen. Bei den Jungbeständen scheinen dagegen niedrige Radialzuwächse in höheren Stammhöhen vor allem auf Zeitabschnitte nach Zuwachseinbrüchen begrenzt zu sein.

Bei den Jungbeständen werden im Zeitraum bis 2003 die Spitzenwerte im Radialzuwachs von den höheren Scheiben eingenommen, wobei die höchsten Radialzuwächse auf der Stammhöhe gebildet werden, wo das entsprechende Jahr nahe am Mark liegt. Bei den Altbeständen wird der Radialzuwachs der BHD-Scheiben in besonders zuwachsstärkigen Jahren nur bis 1976 vom Radialzuwachs der höheren Scheiben überschritten.

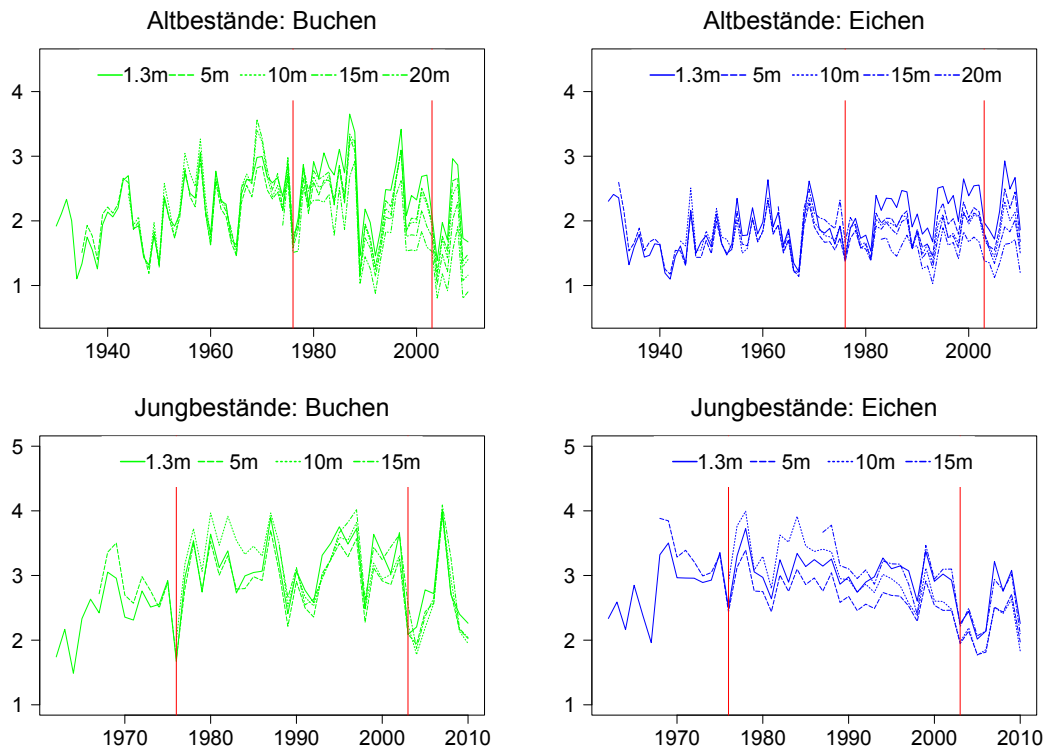


Abbildung 43: Mittlere Radialzuwachsreihen in unterschiedlichen Stammhöhen für die untersuchten Buchen (links) und Eichen (rechts), getrennt nach Alt- (oben) und Jungbeständen (unten)

Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind durch vertikale rote Linien gekennzeichnet.

Die Radialzuwächse verlaufen in den unterschiedlichen Stammhöhen weitestgehend synchron. Bei den Altbeständen liegt das Niveau der Radialzuwächse der Scheiben aus höheren Stammhöhen unter dem der Scheibe aus 1.3 m Höhe.

Im Anhang 12 sind die mittleren Radialzuwächse in unterschiedlichen Stammhöhen getrennt nach Buchen und Eichen für alle Standorte dargestellt.

4.5.3 Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse für die Radialzuwächse auf 1.3 m Höhe

Die Hauptkomponentenanalysen wurden mit unterschiedlichen Eingangsdaten durchgeführt. Dieses waren die mittleren Radialzuwachsreihen der Standort-Baumarten-Kombination (Absolutwerte in 1.3 m Höhe), sowie die mittleren Indexreihen der STO-BA-Kombination (einzelbaumweise Trendbereinigung mit 10-, 20-, 30-, 40- und 50-jährigem Spline und anschließende Mittelwertbildung). Alle Hauptkomponentenanalysen wurden für verschiedene Kollektive und verschiedene, gemeinsame Überlappungszeiträume durchgeführt. Dieses waren im Einzelnen:

- Alt- und Jungbestände für den Zeitraum 1962 bis 2010
- Altbestände für den Zeitraum 1930 bis 2010
- Jungbestände für den Zeitraum 1962 bis 2010.

Zusammenfassend sind die relativen Eigenwerte der ersten drei Hauptkomponenten für die unterschiedlichen Teilkollektive und Analysezeiträume in Tabelle 6 dargestellt. Bei allen durchgeführten Analysen zeigt sich zunächst ein deutliches gemeinsames Signal der Radialzuwächswerte, unabhängig davon welches Kollektiv analysiert wurde oder mit welchen Zeitreihen (Absolutwerte oder Indexwerte) gearbeitet wurde. Die Faktorladungen der ersten Hauptkomponente weisen durchgängig in dieselbe Richtung und, je nach zugrunde liegenden Eingangsdaten und Kollektiv, werden zwischen 40.8 und 55.8 % der Gesamtvarianz erklärt (= relativer Eigenwert der ersten Hauptkomponente). Erst auf der zweiten bzw. dritten

Hauptkomponente erfolgt bei den mit den flexibelsten Splines (10- oder 20jährige Splines) trendbereinigten Jahringdaten eine Unterscheidung zwischen Buchen und Eichen (durch unterschiedlich gerichtete Faktorladungen), allerdings nur wenn die Kollektive Alt- und Jungbestände getrennt voneinander analysiert werden. Diejenigen Hauptkomponenten, die in den beiden Kollektiven eine ausnahmslose Trennung in Buchen und Eichen ergeben, haben einen Erklärungsanteil von jeweils ca. 16 %. Wobei diese Aussage für die mit dem 20jährigen Spline trendbereinigten Radialzuwachsreihen der Altbestände und für die mit dem 10 jährigem Spline trendbereinigten Radialzuwachsreihen der Jungbestände zutrifft.

Tabelle 6: Zusammengefasste Ergebnisse der Hauptkomponentenanalysen für verschiedene Kollektive

Als Eingangsdaten wurden die Absolutwerte oder die mit unterschiedlichen Splinefunktionen trendbereinigten Indexwerte verwendet. Angegeben ist der Anteil der erklärten Varianz an der Gesamtstreuung der Daten als relativer Eigenwert der jeweiligen Hauptkomponente. Farblich gekennzeichnet ist, zwischen welchen Kollektiven die ersten drei Hauptkomponenten eine Aufteilung durch umgekehrte Vorzeichen der Faktorladungen bewirken.

	Trendbereini- gungsverfahren	10-jähriger Spline	20-jähriger Spline	30-jähriger Spline	40-jähriger Spline	50-jähriger Spline	Absolut- werte
Alt- und Jungbestände (1962 bis 2010)							
1. Hauptkomponente		45.8 %	44.9 %	42.9 %	41.6 %	40.8 %	40.2 %
2. Hauptkomponente		13.5 %	13.9 %	13.7 %	13.2 %	12.8 %	14.5 %
3. Hauptkomponente		10.1 %	9.4 %	9.1 %	9.2 %	9.4 %	10.2 %
Altbestände (1930 bis 2010)							
1. Hauptkomponente		48.6 %	48.5 %	46.9 %	46.1 %	45.7 %	23.9 %
2. Hauptkomponente		15.9 %	16.1 %	17.3 %	17.5 %	17.5 %	8.8 %
3. Hauptkomponente		12.1 %	11.3 %	11.2 %	11.7 %	11.9 %	5.7 %
Jungbestände (1962 bis 2010)							
1. Hauptkomponente		55.8 %	52.4 %	49.4 %	47.6 %	46.8 %	23.3 %
2. Hauptkomponente		16.0 %	16.0 %	16.8 %	16.7 %	16.4 %	8.5 %
3. Hauptkomponente		10.8 %	11.3 %	11.3 %	12.0 %	12.6 %	6.7 %
XX	<u>Buchen und Eichen</u> an allen Standorten durch unterschiedliche Vorzeichen der Faktorladungen eindeutig getrennt; bei grauer Schrift mit einer Ausnahme.						
XX	Trennung der beiden Untersuchungsregionen (Schwarzwald vs. Stromberg) durch unterschiedliche Vorzeichen der Faktorladungen, bei grauer Schrift mit einer Ausnahme.						
XX	Trennung der <u>Expositionen (Nord- vs. Südhang)</u> durch unterschiedliche Vorzeichen der Faktorladungen; bei grauer Schrift mit einer Ausnahme.						

Werden die mit einem 10jährigen Spline trendbereinigten mittleren Indexserien der Alt- und Jungbestände zusammen betrachtet, trennt die zweite Hauptkomponente vornehmlich zwischen den Alterskollektiven und nur im Teilkollektiv der Altbestände wird bei dieser Analyse deutlich zwischen Buchen- und Eichen getrennt. Werden bei der Analyse aller Bestände, die mit dem 20jährigen Spline trendbereinigten Daten zugrunde gelegt, trennt die dritte Hauptkomponente nach dem vorstehend beschriebenen Muster (beide Beobachtungen sind nicht in Tabelle 6 dargestellt).

Der Überblick in Tabelle 6 zeigt, dass neben der Unterscheidung der Kollektive hinsichtlich der Baumarten, auch die Zuordnung zu einer Untersuchungsregion (Schwarzwald oder Stromberg) oder zu einer Exposition (Nord- oder Südhang) zur Erklärung der Gesamtstreuung beiträgt. Speziell für die Jungbestände fällt ab den mit 20jährigem oder mit steiferem Spline trendbereinigten Radialzuwachsindices auf, dass die Unterscheidung zwischen Nord- und Südhang bedeutender ist, um die vorhandene Streuung in den Indexserien zu erklären, als die Unterscheidung zwischen Buchen und Eichen.

Insgesamt wird aus Tabelle 6 deutlich, dass die Indexserien denen Radialzuwachswerte der Einzelbäume zugrunde liegen die mit einem 10 oder 20jährigen Spline trendbereinigt wurden, die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten am deutlichsten aufzeigen. Um für die weiteren Analysen mehr Klarheit zu erhalten, welches der beiden genannten Trendbereinigungsverfahren eine deutlichere Auftrennung zwischen Buchen und Eichen ergibt, wurden zusätzliche Hauptkomponentenanalysen mit den Radialzuwachsserien und den verschiedenen Indexwerten der Einzelbäume durchgeführt. Die graphische Auswertung der Faktorladungen der zweiten und dritten Hauptkomponente in der Form von typischen Punktdiagrammen (nicht gezeigt) ergab bei den mit dem 20jährigem Spline trendbereinigten Radialzuwachsserien eine deutlichere Aufteilung in Buchen und Eichen, daneben wird in der dritten Hauptkomponente deutlicher zwischen den Regionen getrennt. Aus diesem Grund wurde für den direkten Vergleich der beiden Baumarten (Kapitel 4.5.4) und für die Witterungs-Wachstums-Beziehungen (Kapitel 4.6) mit den mit 20jährigem Spline trendbereinigten Radialzuwachsindices gearbeitet.

Im Anhang 6 sind die gemessenen Absolutwerte des Radialzuwachses der BHD-Scheiben, als quadratisches Mittel aus i.d.R. acht Radien, mit der 20jährigen Splinesfunktion und die resultierenden Indexwerte des Radialzuwachses für alle 80 Untersuchungsbäume dargestellt.

4.5.4 Quotienten der trendbereinigten Radialzuwachsserien

Abbildung 44 zeigt den aus den mittleren Indexserien aller Untersuchungsbäume ermittelten Quotienten von Buchen und Eichen. Dabei wurden die mit dem 20jährigen Spline trendbereinigten Radialzuwachsserien der Buchen durch die trendbereinigten Radialzuwachsserien der Eichen dividiert. Die unmittelbare Reaktion der Buchen im Trockenjahr 1976 ist deutlich erkennbar. Im Trockenjahr 2003 erfolgte der Tiefpunkt im Vergleich zur Eiche dagegen erst im Trockenfolgejahr (2004). Aus der Abbildung wird ebenfalls deutlich, dass die beiden Trockenjahre nicht die größten Schwankungen zwischen den beiden Baumarten verursacht haben. So ist vom Jahr 1965 bis zum 1967 eine überproportionale Zuwachssteigerung der Buche und gleich darauf im Jahr 1968 ein außergewöhnlicher Abfall des Radialzuwachses im Vergleich zur Eiche erkennbar. Auch in den Jahren 1988/1989 zeigt die Buche eine deutliche Reduktion des Radialzuwachses im Vergleich zur Eiche und im Jahr 2009 liegen die Zuwachsrückgänge der Buche in ähnlicher Größenordnung wie im Trockenfolgejahr 2004.

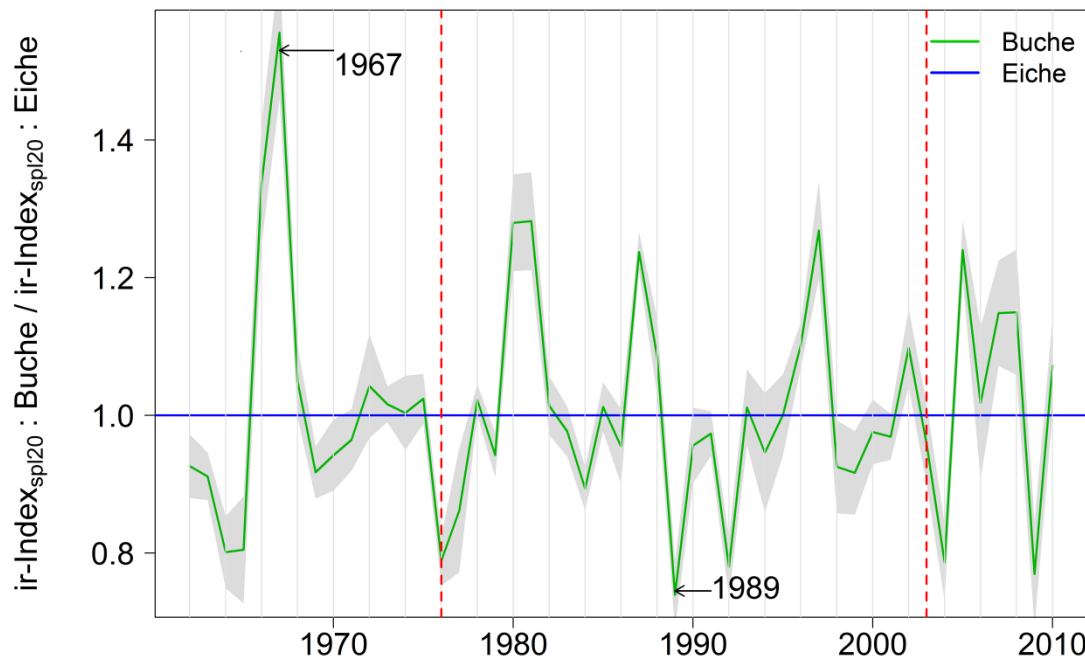


Abbildung 44: Verlauf der mittleren Quotienten der Radialzuwachsindices

Dargestellt ist der indexierte Radialzuwachs der Buchen bezogen auf die Indexserie der Eichen. Die zugrunde gelegten Radialzuwachsindices resultieren aus einer einzelbaumweisen Trendbereinigung der Radialzuwachsreihen auf 1.3 m Höhe mit einem 20jährigen Spline. Diese wurden für die fünf Bäume pro Standort zu einer Serie gemittelt. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind mit vertikalen gestrichelten roten Linien gekennzeichnet. Der graue Hintergrund stellt den Standardfehler dar ($n=8$).

1976 sinkt der Radialzuwachs der Buche unmittelbar unter das Niveau der Eiche, 2003 erst im Trockenfolgejahr. Großen Abweichungen zwischen den beiden Baumarten beschränken sich nicht nur auf die beiden Trockenjahre.

4.6 Witterung-Wachstumsbeziehungen im Radialzuwachs

4.6.1 Response functions mit Monatswerten

Abbildung 45 stellt die Ergebnisse der *response functions* (vgl. Kapitel 3.4.3.4) beispielhaft für den Standort Spielberg (SP) dar. Als Antwortvariable wurden die mit einem 20jährigen Spline trendbereinigten Radialzuwachswerte der BHD-Scheibe verwendet (mittlere Indexserie aus den fünf Bäumen). Prädiktorvariablen waren:

- die Monatssumme des Niederschlags,
- die monatliche Durchschnittstemperatur,
- der monatliche Durchschnitt des Matrixpotenzials,
- der monatliche Durchschnitt der relativen Bodenfeuchte unter dem Grenzwert von 0.4 (REW_{int} -Wert),

wobei jeweils die Zusammenhänge für den Zeitraum April des Vorjahres (-4) bis September (9) im laufenden Jahr geprüft wurden. Signifikante Regressionskoeffizienten sind mit roten Sternchen (Niederschlag), rotem Dreieck (Temperatur), rotem Kreuz (Matrixpotenzial) oder rotem X (REW_{int}) gekennzeichnet. Gemäß dieser Analyse für den Standort Spielberg wirken sich hohe Niederschlagssummen der Monate Mai und Juni des laufenden Jahres signifikant positiv auf den Radialzuwachs der Buchen aus, während die Eichen signifikant vom Niederschlag im September des Vorjahres und vom Niederschlag im März des laufenden Jahres profitieren. Signifikant positiv auf den Radialzuwachs der Buchen wirken die Durchschnittstemperaturen im April des laufenden Jahres sowie im Oktober des Vorjahres. Signifikant negativ auf den Radialzuwachs von Buchen und Eichen wirken dagegen die Durchschnittstemperaturen im August des Vorjahres. Das Matrixpotenzial im Juli des laufenden Jahres zeigt bei der Buche einen signifikant positiven Einfluss auf den Radialzuwachs. Als signifikant positiv wird bei der Buche auch das Matrixpotenzial im November des Vorjahres erkannt. Bei den Eichen zeigt der September des Vorjahres eine

signifikant positive *response function* für das Matrixpotenzial. Hohe Werte des pflanzenverfügbaren Wassers (REW_{int}) in den Monaten Juli und August des laufenden Jahres wirken sich positiv auf den Radialzuwachs der Buchen aus. Für die Eiche ergeben sich mit diesem Prädiktor keine Signifikanzen.

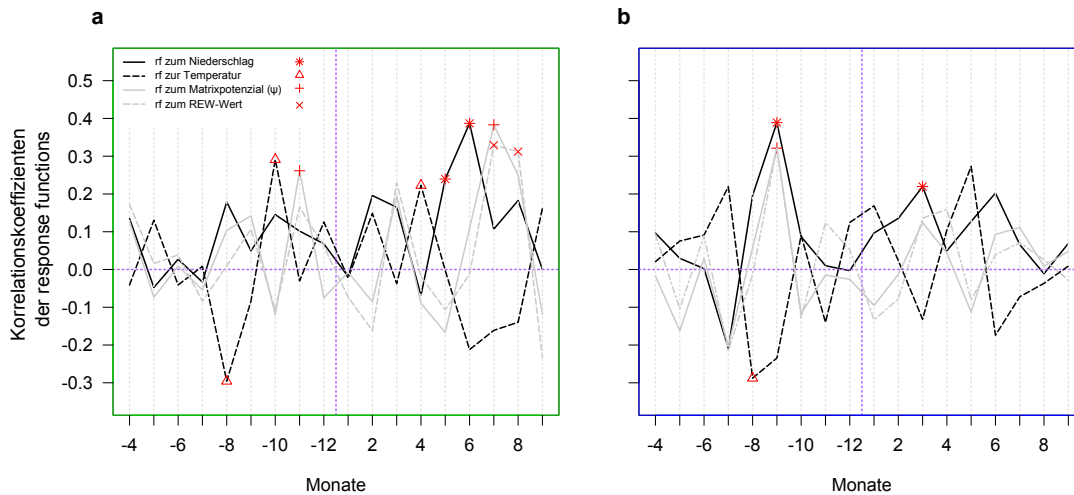


Abbildung 45: Koeffizienten der *response functions* (rf) für den Standort Spielberg

Dargestellt sind die Koeffizienten der *response functions* zu den Indexserien der Buchen (a, links) und der Eichen (b, rechts). Analysiert wurden die Monatswerte von Niederschlag, Temperatur, Matrixpotenzial und relativer Bodenfeuchte (REW-Wert). Gezeigt sind die Koeffizienten der Monate April des Vorjahres (-4) bis September des laufenden Jahres (9) (rote Symbole: signifikante Koeffizienten, $p < 0,05$). Die Koeffizienten zu den beiden Bodenwasserhaushaltsvariablen und zum Niederschlag sind gleichgerichtet, die zur Temperatur meist invers.

Schon am Beispiel des Standortes Spielberg zeigt sich, dass die *response functions* zwar Hinweise auf Zusammenhänge zwischen Witterungsparametern und Radialzuwachs geben, die ermittelten signifikanten Zusammenhänge jedoch nur zum Teil physiologisch erklärbar sind. So ist im hier erläuterten Beispiel für die Buchen der signifikante positive Zusammenhang mit dem Matrixpotenzial im November des Vorjahres kaum physiologisch erklärbar. Dass die Regression in diesem Fall dennoch als signifikant gekennzeichnet wird zeigt, dass die Methode nicht in allen Fällen plausible Ergebnisse liefert. Dies hängt sicherlich damit zusammen, dass einerseits aufgrund der nacheinander mit den einzelnen Prädiktor-Variablen durchgeführten Regressionen, die Multikollinearität der untersuchten Witterungsparametern nicht ausreichend berücksichtigt wird, und andererseits die „unnatürlichen“ Einteilung der Witterungs- und Bodenwasserverfügbarkeitsdaten in Monatswerte zu fälschlicherweise als signifikant bestimmten Regressionskoeffizienten führt (vgl. Kapitel 3.4.3.4). Im Anhang 17 sind die *response functions* der Witterungs- bzw. Bodenwasserhaushaltsdaten für alle Standorte mittels Liniendiagrammen dargestellt. Auch hier treten in einzelnen Fällen nicht erklärbare signifikante *response functions* auf. Dennoch sind allgemeine Trends zu erkennen:

- In beiden Untersuchungsregionen zeigen die Buchen bei den signifikant positiven Monaten zu den Niederschlägen im Sommer (v.a. Juni) des laufenden Jahres höhere Regressionskoeffizienten als die Eichen. Der Radialzuwachs der Buchen würde demnach also stärker von den Niederschlägen in den Sommermonaten des laufenden Jahres abhängen als derjenige der Eichen.
- Bei den Buchen haben die Niederschläge im April des laufenden Jahres an allen Standorten (bis auf LT) einen (nicht signifikanten) negativen Einfluss auf den Radialzuwachs, die Niederschläge der folgenden Monate bis September haben dagegen einen positiven Einfluss. Dieser ist im Juni und Juli an vielen Standorten signifikant. Die Eichen zeigen hier fast dasselbe Muster, allerdings haben an vielen Standorten die Monate April *und* Mai einen

negativen Einfluss. Da hohe Niederschläge allein bzw. eine gute Wasserversorgung der Bäume auf den frei drainierbaren Standorten kaum einen Rückgang des Wachstums verursachen, müssen hierfür andere Faktoren verantwortlich sein. Die mit den hohen Niederschlägen einhergehenden niedrigen Temperaturen könnten wachstumslimitierend wirken, allerdings schwanken die Kurven der Regressionskoeffizienten mit den mittleren Monatstemperaturen in den ersten Monaten des laufenden Jahres stark und zeigen fast keine Signifikanzen.

- Die Kurvenverläufe der Regressionskoeffizienten von Matrixpotenzial und integrierten REW-Werten gleichen denen der Niederschläge, wobei die Kurven mit den beiden Größen zur Bodenwasserverfügbarkeit um einen Monat versetzt zum Niederschlag sind. Die Bodenwasserverfügbarkeit reagiert damit zeitverzögert und hängt sehr viel deutlicher von den Niederschlägen als von den Temperaturen ab.
- Die Kurven mit den Regressionskoeffizienten der Temperaturdaten verlaufen in fast allen Fällen (Ausnahme LT) weitestgehend invers zu denen des Niederschlags. Als negativ signifikant wird bei Buchen und Eichen gleichermaßen an vielen Standorten die Durchschnittstemperatur im August des Vorjahres angezeigt.

4.6.2 Korrelationen mit Tageswerten

Um die z.T. nicht plausiblen *response functions* weiter zu überprüfen, wurde eine detailliertere Analyse zunächst der Witterungsparameter Niederschlag und Temperatur auf der Basis von Tageswerten durchgeführt. Abbildung 46 zeigt die (verkürzte) Ausgabegraphik des Programms CLIMTREG ebenfalls am Beispiel des Standorts Spielberg (SP). Dargestellt sind in gelblichen Farbtönen negativ signifikante Korrelationen, in grünlichen Farbtönen positiv signifikante Korrelationen. Die beiden oberen Grafiken (a) zeigen die Zusammenhänge für die Buche, die beiden unteren (b) für die Eiche. Die obere Teilgrafik zeigt die Korrelationen mit der Temperatur, die untere mit dem Niederschlag. Eingabeparameter in CLIMTREG für diese Analysen waren die tägliche Maximaltemperatur und die tägliche Niederschlagssumme, sowie als Antwortvariable die mit 20jährigem Spline trendbereinigten Radialzuwachsindices der BHD-Scheibe. Am Beispiel Spielberg wird deutlich, dass sich hohe Niederschläge im Zeitraum Mai bis Juli des laufenden Jahres positiv auf den Radialzuwachs der Buchen ausgewirkt haben (Abbildung 46a). Wenn z.B. der Zeitraum 5. Juni bis 10. August betrachtet wird, ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 0.817. Aufgrund der in der Antwortvariable (vgl. Tabelle 5) und wahrscheinlich auch in den Prädiktorvariablen vorhandenen Autokorrelation sind diese Signifikanzwerte jedoch sicherlich überhöht. Hohe Temperaturen im Juni und Juli wirken sich dagegen negativ auf den Radialzuwachs der Buche aus. Im Gegensatz dazu zeigen die Korrelationskoeffizienten der analysierten Eichen mit den täglichen Temperatur- und Niederschlagsdaten am Standort Spielberg keine sehr deutlichen Muster bzw. über einen längeren Zeitraum keine durchgängig hohe Werte (Abbildung 46b). Der gemäß den *response functions* eindeutig signifikante Zusammenhang mit den Niederschlägen im September des Vorjahres ist zwar zu erkennen, aber in den Farbplots nicht sehr ausgeprägt.

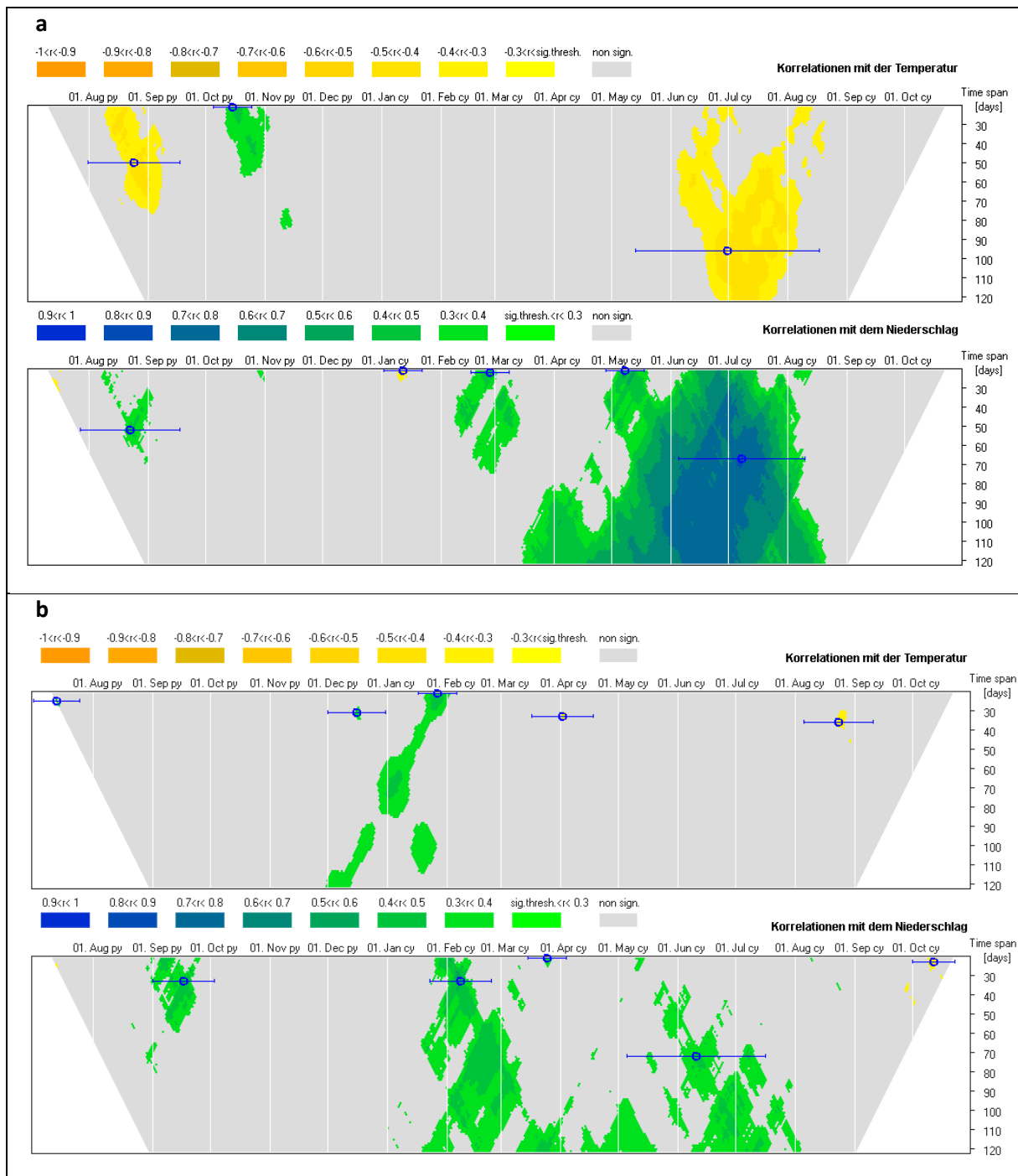


Abbildung 46: Korrelationskoeffizienten zwischen den Indexserien der Buchen (a, oben) bzw. Eichen (b, unten) und den täglichen Maximaltemperaturen (obere Teilgrafiken) bzw. der täglichen Niederschlagssumme (untere Teilgrafiken) am Standort Spielberg (SP)

Ergebnis der CLIMTREG-Analyse (BECK ET AL. 2013) (Zeitraum 1971 – 2010).

Die Indexserie der Buche ist eng positiv mit den Niederschlägen im Sommer des laufenden Jahres (Mai bis Juli) korreliert (a, untere Teilgrafik). Diese Korrelation ist deutlich enger und über einen längeren Zeitraum stabil, als bei Eiche (b, untere Teilgrafik). Nur für Buche zeigen sich deutlich negative Korrelationen mit den Temperaturen im Juli und August des laufenden Jahres (a, obere Teilgrafik).

Im Anhang 18 ist die vorgestellte Grafik für alle untersuchten Standorte dargestellt. Hinsichtlich der Unterschiede zwischen Buchen und Eichen ergibt sich das folgende zusammengefasste Bild: Für den Radialzuwachs der Buchen sind die Niederschläge im Sommer des laufenden Jahres (Mai bis Juli) entscheidend – eine gewisse Ausnahme stellt der Standort Lautenbach (LT, Nordosthang im Schwarzwald) dar, ein nur abgeschwächtes Niederschlagssignal ist auch am Standort Sternenfels Südhang (SS, Südhang im Stromberg) vorhanden. Der Einfluss der Niederschläge im Sommer/Herbst des Vorjahres auf den Radialzuwachs der Buchen ist dagegen deutlich geringer. An

allen Standorten der untersuchten Jungbestände (Heuweiler, Sulzburg, Leonbronn und Spielberg) kann ein negativer Einfluss der Temperaturen im Sommer des laufenden Jahres auf den Radialzuwachs der Buchen beobachtet werden. Die Bu-Altbestände zeigen diese negativen Korrelation mit den Temperaturen nicht für das laufende, sondern - etwas abgeschwächt - für die Temperaturen im Sommer/Herbst des Vorjahres. Im Gegensatz zu den Buchen zeigt der Radialzuwachs der Eichen eine deutlich geringere Abhängigkeit vom Niederschlag im Sommer, am stärksten ausgeprägt erscheinen diese Zusammenhänge noch an den Südhängen im Schwarzwald. Die negativen Korrelationen mit den Temperaturen treten bei den untersuchten Eichen kaum und nur sporadisch auf, eine gewisse Ausnahme stellt hierbei der Standort Leonbronn (LN, Nordhang im Stromberg) dar, an dem Buchen und Eichen sehr ähnliche Muster zeigen.

Die Berechnung der Korrelationen von Jahrringindices mit den Tageswerten des Matrixpotenzials oder dem relativem pflanzenverfügbaren Bodenwasser (REW-Wert) ergab sehr ähnliche Muster wie die hier bzw. im Anhang 18 vorgestellten. Aufgrund des im Vergleich zum täglichen Niederschlag ausgeglicheneren bzw. trägeren Verlaufs der täglichen Matrixpotenzial- und REW-Werte treten in den Abbildungen jedoch keine „gefleckten“ Muster mit kurzen, voneinander unabhängigen, signifikanten Perioden mehr auf, sondern stärker zusammenhängende Perioden (vgl. Abbildung 47 für den Standort Spielberg). Die ermittelten Signifikanzwerte liegen für die Korrelationen mit den beiden Bodenwasserhaushaltsgrößen im Vergleich zu den hochflexiblen täglichen Niederschlagswerten etwas niedriger. Da die Korrelationen zwischen Matrixpotenzialwerten und Jahrringindices sowie zwischen REW-Werten und Jahrringindices sehr ähnlich waren und fast identische Muster in der CLIMTREG-Analyse zeigten, wird im Folgenden mit den Matrixpotenzialwerten gearbeitet.

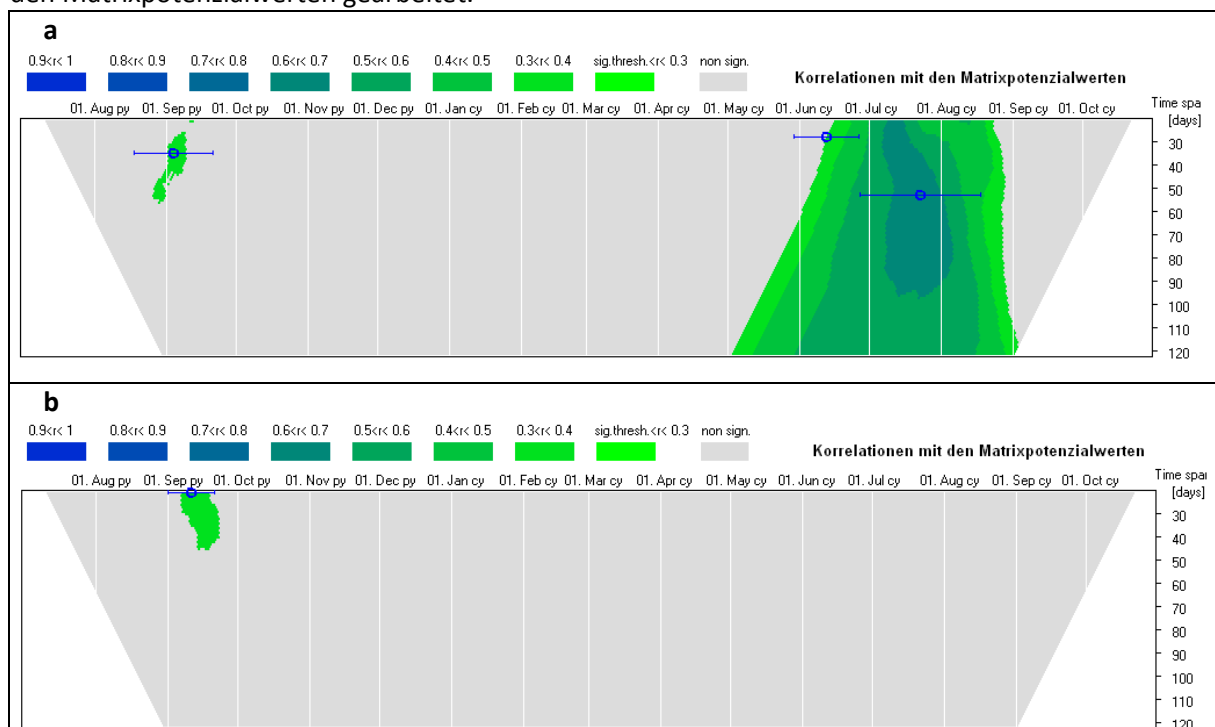


Abbildung 47: Korrelationskoeffizienten zwischen den Indexserien der Buchen (a, oben) bzw. Eichen (b, unten) und den täglichen Matrixpotenzialwerten am Standort Spielberg (SP)

Ergebnis der CLIMTREG-Analyse (BECK ET AL. 2013) (Zeitraum 1971 – 2010).

Die Indexserie der Buche (a) ist eng positiv mit den Matrixpotenzialwerten von Juni bzw. bei länger integrierten Matrixpotenzialen auch von Mai bis Mitte/Ende August korreliert. Die Indexserie der Eichen (b) zeigt dagegen fast keine signifikanten Korrelationen mit dem Matrixpotenzial.

4.7 Trockenstress-Reaktion des Radialzuwachses

4.7.1 Trockenstresskennzahlen in den beiden Trockenjahren

Abbildung 48 zeigt die Trockenstressreaktion des Radialzuwachses in 1.3 m Höhe von allen untersuchten Buchen und Eichen in der Form der unter Kapitel 3.4.3.5 eingeführten Dreiecksdiagramme für die Trockenjahre 1976 (links, a) und 2003 (rechts, b). Im Vergleich der beiden Trockenjahre wird deutlich, dass 2003, trotz des länger gewählten Erholungszeitraums, das Ausgangsniveau von beiden Baumarten nicht erreicht wurde. Dies ist auch damit zu begründen, dass das relative Matrixpotenzial im Erholungszeitraum (ψ_{Rs}) nach dem Trockenjahr 2003 nur geringfügig über dem Niveau der Referenzperiode lag, während im Erholungszeitraum 1976 fast der 1.4-fache Wert erreicht wurde. 2003 sind, wenn alle Bäume gemeinsam betrachtet werden, die Unterschiede zwischen Buchen und Eichen relativ gering. 1976 verlief die *Resistenz-* und *Recovery-Reaktion* von Buchen und Eichen dagegen signifikant unterschiedlich. D.h. die Buchen sind im Trockenjahr signifikant stärker eingebrochen, haben sich dann aber auch signifikant schneller erholt, was letztendlich in einer ähnlichen Resilienz der beiden Baumarten mündet.

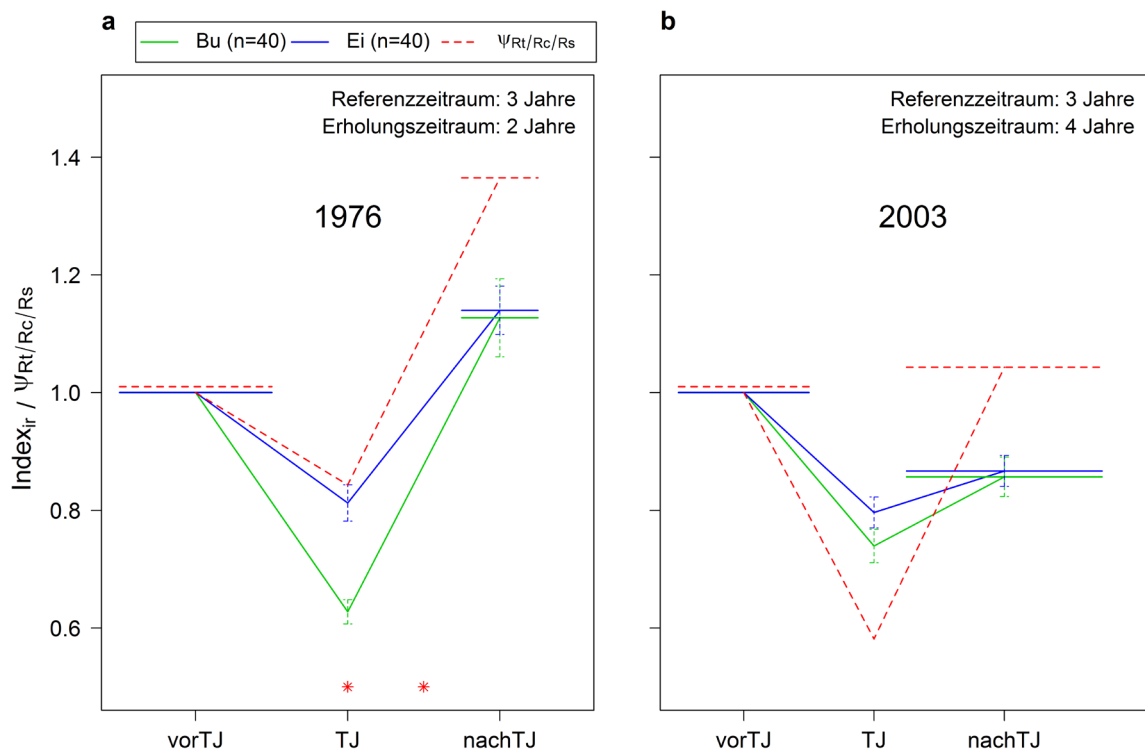


Abbildung 48: Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen sowie relatives Matrixpotenzial ($\psi_{Rt/Rc/Rs}$: April-Sept) in den Trockenjahren 1976 (links, a) und 2003 (rechts, b)

Dargestellt ist die Trockenstressreaktion des Radialzuwachses in 1.3 m Höhe mit den jeweiligen Standardfehlern (rote Sternchen: signifikante Abweichungen zwischen Buchen und Eichen, $p < 0.05$).

Die Buche zeigt 1976 einen signifikant stärkeren Zuwachseinbruch als die Eiche, aber auch eine signifikant schnellere Erholungsreaktion. Die Resilienz unterscheidet sich in beiden Jahren nicht signifikant zwischen den beiden Baumarten.

4.7.2 Trockenstresskennzahlen in den beiden Alterskollektiven

Werden die Alt- und Jungbestände hinsichtlich ihrer Trockenstressreaktion getrennt voneinander beobachtet, so stellt man interessante Unterschiede fest. Abbildung 49 zeigt links (a, c) die Reaktion der beiden Baumarten nach dem Trockenjahr 1976 und rechts nach dem Trockenjahr 2003 (b, d), wobei oben (a, b) die Jungbestände und unten (c, d) die Altbestände abgebildet sind. Zunächst fällt auf, dass die Jungbestände deutlicher auf die Trockenheit reagieren als die

Altbestände. In den Jungbeständen kann sich die Buche nach einem in beiden Jahren signifikant stärkeren Einbruch, auch signifikant schneller erholen als die Eiche. In den Altbeständen sind die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten in den beiden Trockenjahren genau entgegengesetzt. Während 1976 die *Resistenz* und *Resilienz*-Reaktion zwischen den beiden Baumarten signifikant unterschiedlich verlief, war dies 2003 die Erholungsreaktion.

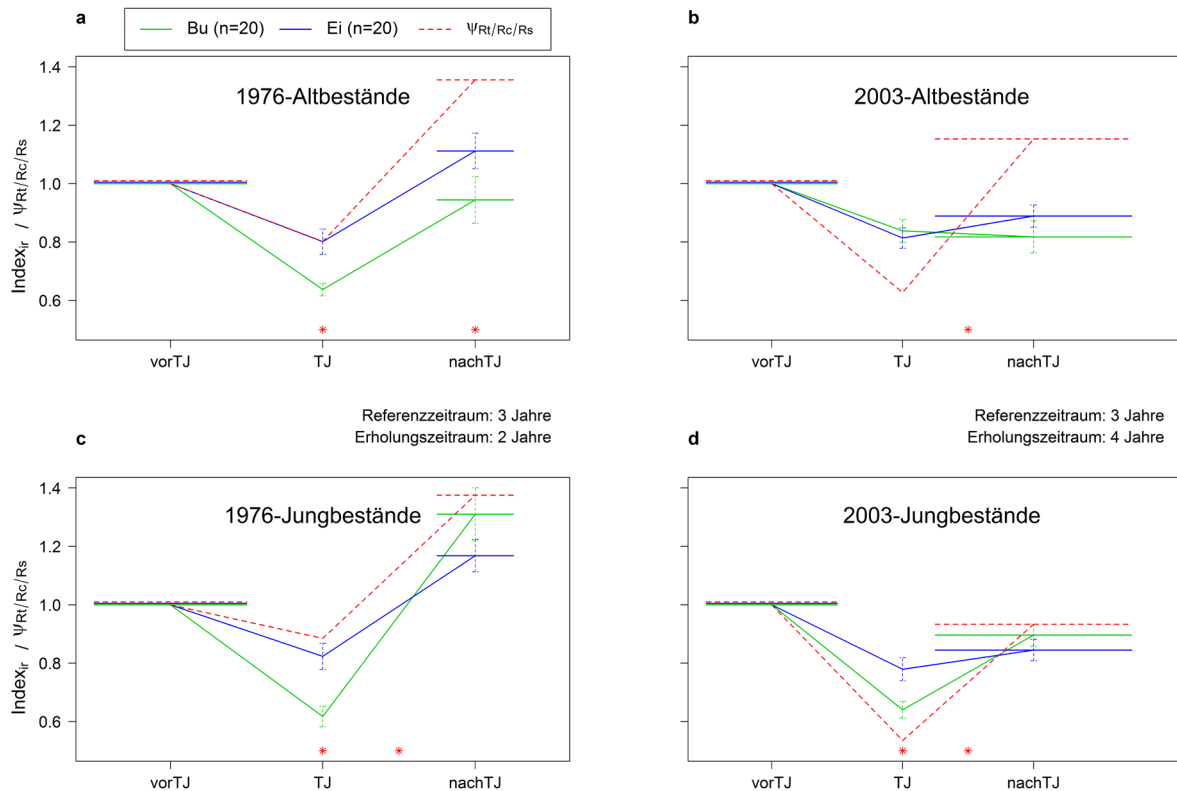


Abbildung 49: Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen sowie relatives Matrixpotenzial ($\Psi_{Rt/Rc/Rs}$: April-Sept) in den Trockenjahren 1976 (links, a und c) und 2003 (rechts, b und d), getrennt für Alt- (oben, a und b) und Jungbestände (unten, c und d)

Dargestellt die Trockenstressreaktion des Radialzuwachses in 1.3 m Höhe mit den jeweiligen Standardfehlern (rote Sternchen: signifikante Abweichungen zwischen Buchen und Eichen, $p < 0,05$).

Vor allem die Buchen zeigen in den Jungbeständen (unten) im Vergleich zu den Altbeständen (oben) eine dynamischere Trockenstressreaktion: starker Zuwachseinbruch im Trockenjahr und anschließend eine relativ rasche Erholung.

4.7.3 Trockenstresskennzahlen an allen Untersuchungsstandorten

In Anhang 13 sind die Trockenstressreaktionen von Buchen und Eichen in und nach den Jahren 1976 und 2003 für alle Untersuchungsstandorte in Form der Dreiecksdiagramme dargestellt. Es werden deutliche Unterschiede in den Erholungsreaktionen der beiden Baumarten an den unterschiedlichen Standorten sichtbar, die in Abbildung 49 dargestellten Muster und Signifikanzen sind nicht für alle Standorte zutreffend.

Zunächst fällt auf, dass die Untersuchungsbäume auf den Nordhängen am Westabfall des Schwarzwaldes (Lautenbach und Heuweiler) in ihrer Trockenstressreaktion von allen anderen Standorten abweichen. Im Jungbestand (Heuweiler) zeigt die Eiche in beiden Trockenjahren eine sehr hohe Resistenz und Resilienz ($R_{t_{Ei-1976}}$: 0,91, $R_{s_{Ei-1976}}$: 0,95, $R_{t_{Ei-2003}}$: 1,00, $R_{s_{Ei-2003}}$: 1,00), im Altbestand (Lautenbach) ist nur nach 2003 ein geringes Absinken der Resilienzwerte ($R_{t_{Ei-1976}}$: 0,97, $R_{s_{Ei-1976}}$: 0,98, $R_{t_{Ei-2003}}$: 1,00, $R_{s_{Ei-2003}}$: 0,91) erkennbar. Die Trockenstressreaktion der Buche ist in diesen beiden Beständen deutlich unterschiedlich: während sie in beiden Jahren im Jungbestand (Heuweiler) deutlich einbricht und sich wieder erholt ($R_{t_{Bu-1976}}$: 0,61, $R_{s_{Bu-1976}}$: 1,08, $R_{t_{Bu-2003}}$: 0,60, $R_{s_{Bu-2003}}$: 1,05), fallen die Resilienzwerte im Altbestand (Lautenbach) nach 1976 und 2003 unter die

Resistenzwerte ($R_{t_{Bu-1976}}: 0.66$, $R_{s_{Bu-1976}}: 0.54$, $R_{t_{Bu-2003}}: 0.83$, $R_{s_{Bu-2003}}: 0.68$). Es fand also bei den Buchen in Lautenbach im vergleichbaren Zeitraum nach den Trockenjahren keine Erholung statt.

Wenn die Unterschiede in den Trockenstressreaktionen der einzelnen Standorte zwischen den Trockenjahren 1976 und 2003 und dabei wiederum die Unterschiede zwischen Buche und Eiche betrachtet werden, fallen auch die beiden trockensten Standorte Sternenfels-Südhang und Spielberg auf (Alt- und Jungbestand auf Südhängen am Stromberg). An beiden Standorten kann 2003 im Vergleich zu 1976 eine deutlich veränderte Trockenstressreaktion der Buche beobachtet werden. Während in Spielberg die Buche 1976 noch eine sehr deutliche, über das Niveau der Eiche hinausgehende, Erholungsreaktion zeigt ($R_{C_{Bu-1976}}: 2.74$, $R_{C_{Ei-1976}}: 0.98$), ist diese positive Abweichung zur Eiche 2003 sehr gering ($R_{C_{Bu-2003}}: 1.28$, $R_{C_{Ei-2003}}: 1.07$). Am Standort Sternenfels-Südhang ist 1976 noch eine sehr ähnliche Trockenstress- und Erholungsreaktion von Buchen und Eichen zu beobachten ($R_{C_{Bu-1976}}: 1.40$, $R_{C_{Ei-1976}}: 1.48$), 2003 fällt der Resilienzwert der Buche jedoch unter deren Resistenzwert, d.h. die Buche zeigt im Vergleich zur Eiche an diesem Standort eine signifikant schwächere Erholungsreaktion ($R_{C_{Bu-2003}}: 0.88$, $R_{C_{Ei-2003}}: 1.04$). Damit zeigen in beiden Alterskollektiven die beiden „mittleren Standorte“ (Südhänge am Westabfall des Schwarzwaldes: Attental und Sulzburg, Nordhänge im Stromberg: Sternenfels-Nordhang und Leonbronn) die geringsten Veränderungen zwischen den beiden Baumarten im Vergleich der Trockenjahre 1976 und 2003. Allerdings wird auch bei diesen „mittleren Standorten“ das aus Abbildung 48 bekannte Muster deutlich: 2003 liegen die Resilienzwerte im Vergleich zu 1976 deutlich tiefer, aber ohne signifikante Unterschiede zwischen den beiden Baumarten.

4.7.4 Trockenstresskennzahlen in verschiedenen Stammhöhen

Aufschlussreich ist die Darstellung der Trockenstressreaktion entlang der Stammhöhe. Diese ist in Abbildung 50 zusammengefasst für die Altbestände und im Anhang 14 für alle Untersuchungsstandorte einzeln dargestellt. Beide Baumarten zeigen in beiden Trockenjahren den stärksten Einbruch auf 1.3 m Höhe, diese Reaktion wird mit zunehmender Stammhöhe schwächer. Auf 1.3 m Höhe erfolgt auch die *Recovery* beider Baumarten am schnellsten, wobei nach dem Trockenjahr 2003 vor allem bei der Buche auffällt, dass - trotz des Erholungszeitraums von vier Jahren - in den oberen Stammhöhen keine Erholungsreaktion stattfindet, sondern die Resilienz der Bäume offensichtlich überschritten wurde, da diese noch unter das Niveau der Resistenzwerte fällt. Im Gegensatz dazu zeigt die Radialzuwachsreaktion der Alteichen in allen Stammhöhen eine deutliche Erholungsreaktion, obwohl auch bei diesen das Zuwachsniveau von vor dem Trockenjahr nicht erreicht wird.

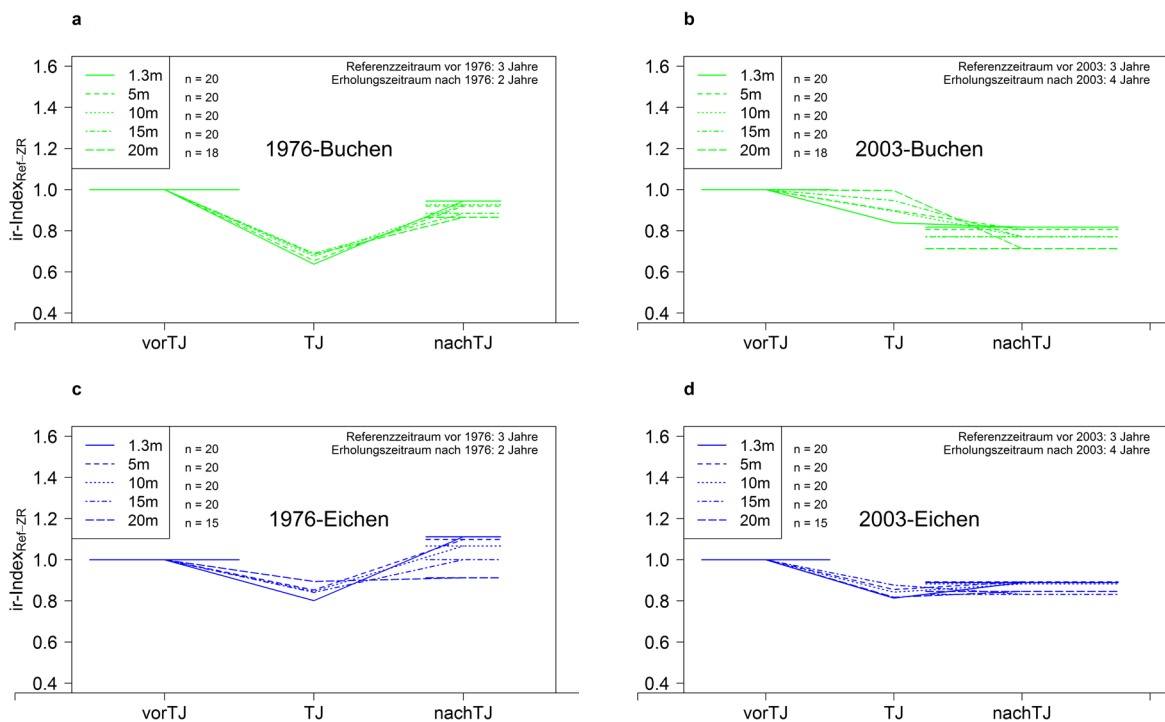


Abbildung 50: Trockenstressreaktion von Buchen (oben) und Eichen (unten) in verschiedenen Stammhöhen in den Trockenjahren 1976 (links, a und c) und 2003 (rechts, b und d).

Dargestellt sind die Trockenstressreaktionen in den Altbeständen.

Der stärkste Zuwachseinbruch erfolgt bei beiden Baumarten in 1.3 m Höhe. Auf dieser Stammhöhe ist auch die Erholungsreaktion am schnellsten.

4.7.5 Trockenstresskennzahlen entlang des Wasserverfügbarkeitsgradienten

Die Untersuchungsstandorte wurden bewusst entlang eines Wasserverfügbarkeitsgradienten ausgewählt, um graduelle Veränderungen in der Trockenstressreaktion der beiden Baumarten entlang dieses Gradienten beobachten zu können. Abbildung 51 zeigt das Ergebnis dieser Analyse für die Recovery-Werte in den beiden Untersuchungsregionen, Schwarzwald (a, links) und Stromberg (b, rechts). Es wird deutlich, dass sich die untersuchten Bäume bei zunehmend angespanntem Wasserhaushalt des Standorts, d.h. stärker negativen mittleren Matrixpotenzialwerten, schlechter erholt haben. Diese Aussage trifft sowohl für die Buchen, mit etwas stärkerem Trend, als auch für die Eichen zu, allerdings ist ein signifikanter Zusammenhang nur für die Standorte im Stromberg, nicht für den Westabfall des Schwarzwaldes nachweisbar.

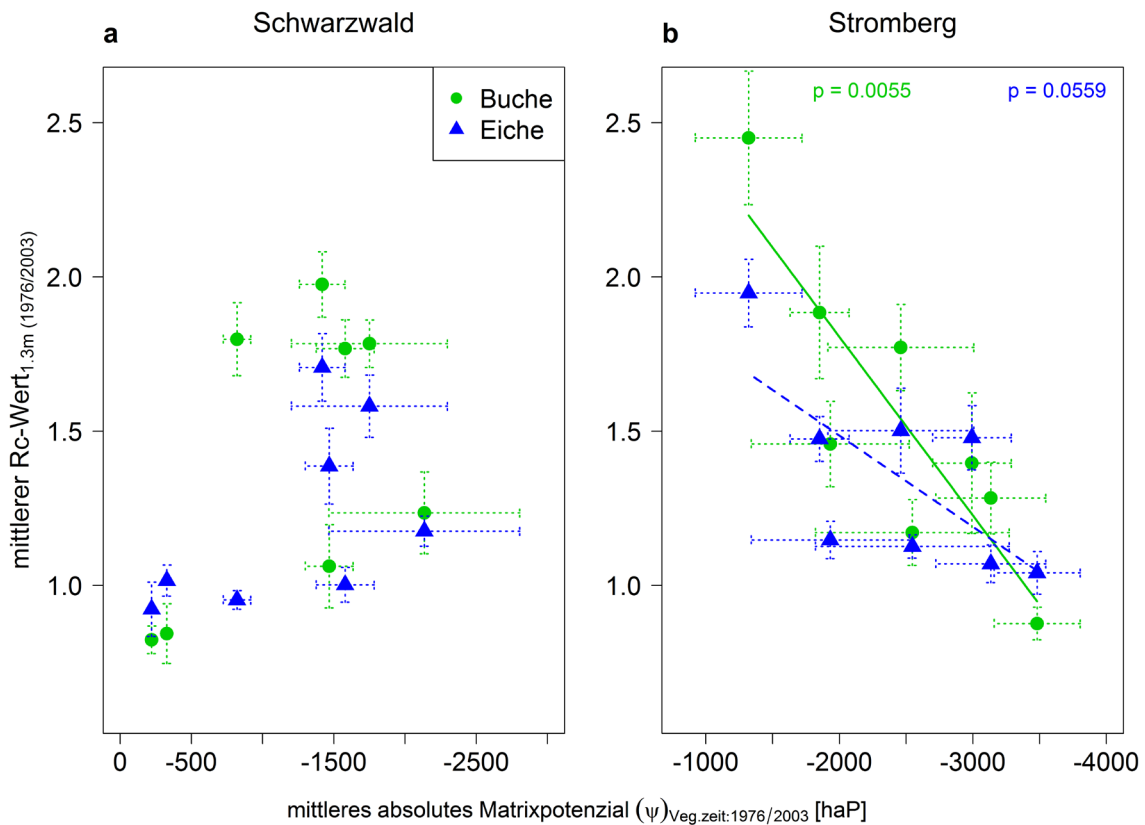


Abbildung 51: Recovery-Werte der Trockenjahre 1976 und 2003 über dem mittleren absoluten Matrixpotenzial (April-Sept), getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart

Die Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes sind links (a), die Standorte im Stromberg rechts (b) dargestellt. Jeder Datenpunkt repräsentiert den aus den Radialzuwachsreihen der BHD-Scheibe berechneten Mittelwert der Trockenstresskennzahlen von fünf Einzelbäumen (Richtung der Ordinate) und sechs Zeitreihen des Matrixpotenzials (Richtung der Abszisse). An jedem Datenpunkt ist der jeweilige Standardfehler angegeben. Die Ausgleichsgerade ist als durchgängige Linie eingezeichnet, wenn die lineare Regression signifikante Ergebnisse ergab (p -Wert < 0.05); als gestrichelte Linie wenn die Ergebnisse schwach signifikant sind (p -Wert < 0.1).

Nur in der Untersuchungsregion Stromberg verlangsamt sich die Erholungsreaktion mit zunehmender Aridität des Standorts.

Im Anhang 15 sind alle drei Trockenstresskennzahlen (Resistenz, Recovery und Resilienz) getrennt für die Untersuchungsregionen Schwarzwald und Stromberg entlang der mittleren Matrixpotenzialwerte in der Vegetationszeit der beiden Trockenjahre dargestellt. Es zeigt sich, dass signifikante Zusammenhänge zwischen den Trockenstresskennzahlen entlang der Wasserverfügbarkeit der Standorte nur für die Recovery der Untersuchungsbaume im Stromberg bestehen, nicht aber für die Resistenz- oder die Resilienz-Werte.

Anders verhält sich dieses, wenn anstelle der absoluten, mittleren Matrixpotenzialwerte der in Kapitel 3.4.3.7 eingeführte trockenjahr-spezifische Matrixpotenzial-Index ($I\Psi_{Tj}$) betrachtet wird. Bezugsebene ist jetzt also nicht mehr die Trockenheit (Aridität) des Standorts im langjährigen Mittel, sondern die Trockenheits-Intensität am jeweiligen Standort in den beiden Trockenjahren 1976 und 2003 im Vergleich zum langjährigen Mittel. Abbildung 52 zeigt, dass sowohl signifikante Zusammenhänge zwischen dem Matrixpotenzial-Index und der Recovery als auch zwischen dem Matrixpotenzial-Index und der Resistenz bestehen. Wiederum sind die Zusammenhänge nur für die Standorte im Stromberg, nicht jedoch für die am Westabfall des Schwarzwaldes signifikant. Die Resistenz-Werte zeigen für beide Untersuchungsregionen keine signifikanten Zusammenhänge (vgl. Anhang 16).

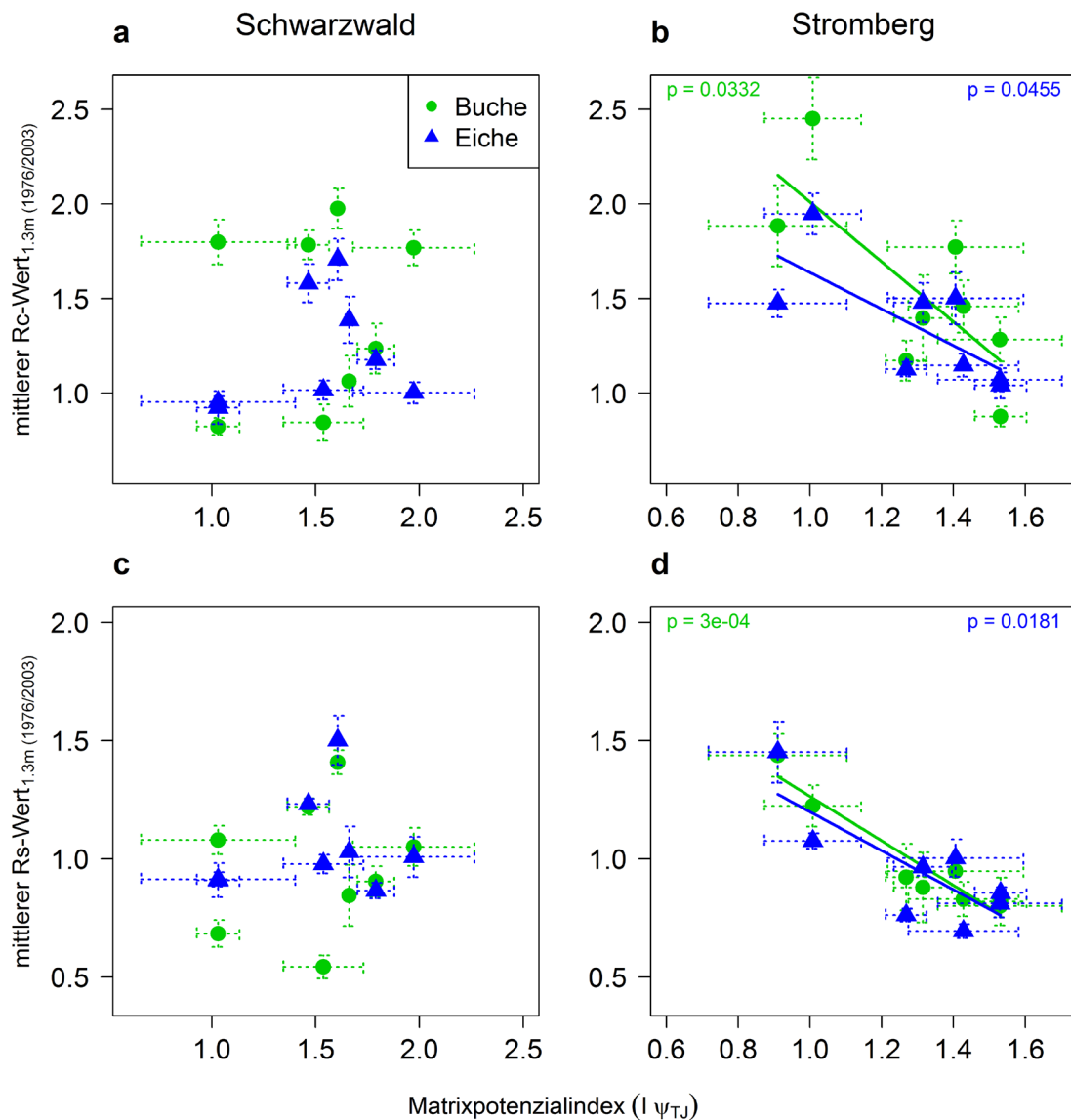


Abbildung 52: Recovery- (a und b, oben) und Resilienz-Werte (c und d, unten) der Trockenjahre 1976 und 2003 über dem trockenjahr-spezifischen Matrixpotenzial-Index ($I\psi_{TJ}$), getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart.

Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes (links, a und c) und im Stromberg (rechts, b und d) dargestellt. Jeder Datenpunkt repräsentiert den aus den Radialzuwachsreihen der BHD-Scheibe berechneten Mittelwert der Trockenstresskennzahlen von fünf Einzelbäumen (Richtung der Ordinate) und sechs Zeitreihen des Matrixpotenzials (Richtung der Abszisse). An jedem Datenpunkt ist der jeweilige Standardfehler angegeben. Die Ausgleichsgerade ist als durchgängige Linie eingezeichnet, wenn die lineare Regression signifikante Ergebnisse ergab (p -Wert < 0.05).

Mit zunehmender Trockenstress-Intensität verlangsamt sich Erholungsreaktion und verringert sich die Belastbarkeit (Resilienz) von Buchen und Eichen in der Region Stromberg signifikant.

5 Diskussion

5.1 Diskussion des Materials

5.1.1 Diskussion der Auswahl der Untersuchungsbestände und der Untersuchungsbäume

Ziel der Untersuchung war es, die Wachstumsreaktion von Buchen und Eichen nach Trockenjahren und die generelle Witterungs-Sensitivität der beiden Baumarten unter baden-württembergischen Verhältnissen zu analysieren. Um Unterschiede zwischen den beiden Baumarten möglichst umfassend bewerten zu können, sollte ein möglichst großer Wasserverfügbarkeitsgradient innerhalb der im Land vorkommenden Spannbreite abgedeckt werden. Neben der Verbreitung von Buche und Traubeneiche in Mischbeständen spielte die Ähnlichkeit der Nährstoffversorgung und vor allem die Durchwurzelungstiefe des Bodens eine zentrale Rolle für die Auswahl der Untersuchungsbestände. Unter den genannten Prämissen boten die beiden Untersuchungsregionen „Westabfall des Schwarzwaldes“ und „Stromberg“ die besten Auswahlmöglichkeiten. Die weitere standörtliche Differenzierung in Süd- und Nordhänge hat sich, auch im Hinblick auf die Ergebnisse aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell (vgl. Kapitel 4.2), als zielführend erwiesen. Die Stratifizierung in, und vergleichende Analyse von Alt- und Jungbeständen hat zu vertieften Erkenntnissen bezüglich der Rolle des Baumalters geführt, wobei die bereits erfolgte Auflichtung in einigen Altbeständen (v.a. Attental, Lautenbach und Sternenfels Nordhang) als Störfaktor in der observatorischen Studie in Kauf genommen werden musste.

Für die baumindividuelle Trockenstressreaktion entscheidend ist die Wasserversorgung des jeweiligen Untersuchungsbaumes. Da das Höhenwachstum bei nicht übershirmten Bäumen kaum von der Konkurrenzsituation abhängig ist, kann auch davon ausgegangen werden, dass der Höhenzuwachs im und nach den Trockenjahren nur in geringem Maße durch die Konkurrenzsituation beeinflusst wird. Anders verhält sich dies beim Radialzuwachs. Dieser ist im Allgemeinen stark von der jeweiligen Konkurrenzsituation abhängig, d.h. auch zum Zeitpunkt der Trockenheit bzw. danach spielt die Konkurrenzsituation eine nicht unerhebliche Rolle. Die baumindividuelle Konkurrenzsituation kann i.W. beschrieben werden durch:

- die Bestandesdichte um den Untersuchungsbaum,
- die soziale Stellung des Untersuchungsbaumes,
- die Entfernung und soziale Stellung der benachbarten Bäume, modifiziert durch die
- Position der Nachbarn am Hang und die Baumarten in der unmittelbaren Umgebung.

Zur quantitativen Beschreibung der Konkurrenzsituation wurden verschiedene positionsabhängige und positionsunabhängige Konkurrenzindices entwickelt (PRETZSCH 2002, 263ff.). Für geklumpte Bestandesstrukturen sind positionsabhängige Konkurrenzindices z.B. mit einem nach oben gerichteten Suchkegel bei differenziertem Öffnungswinkel und unterschiedlichen Ansatzhöhen optimal (BACHMANN 1998). Für regelmäßige Bestandesstrukturen sind positionsunabhängige Konkurrenzindices gleichermaßen geeignet. Der Bestockungsgrad kann als positionsunabhängiger Konkurrenzindex betrachtet werden (PRETZSCH 2002, 274). Im Rahmen dieser Arbeit wurde an jedem Einzelbaum der baumindividuelle Bestockungsgrad ermittelt. Dazu wurden die Ertragstafeln von SCHÖBER (1975) und JÜTTNER (1975), zusammengestellt für baden-württembergische Verhältnisse vom MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM (1993), sowie für die einzelbaumweise beigemischten sonstigen Baumarten die dort vorgeschlagenen Ertragstafeln, herangezogen. Abbildung 53 zeigt den baumindividuellen Bestockungsgrad für alle Untersuchungsbäume und den Mittelwert der jeweiligen STO-BA-Kombination. Es wird deutlich, dass zwischen Buchen und Eichen am selben Standort keine Unterschiede bestehen. Ein für jeden Standort durchgeführter paarweiser t-Test mit den

individuellen Bestockungsgraden von Buchen und Eichen im Vergleich ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Baumarten. Dies ist einerseits der Auswahl von ausschließlich (vor-)herrschenden Untersuchungsbäumen geschuldet, andererseits wäre auch eine insgesamt stärkere Freistellung der lichtbedürftigeren Eichen im Vergleich zu den Buchen plausibel gewesen. Letzteres hätte sich in geringeren Bestockungsgraden an den Eichen-Untersuchungsbäumen niederschlagen müssen, was zumindest zum Aufnahmezeitpunkt aber nicht der Fall war.

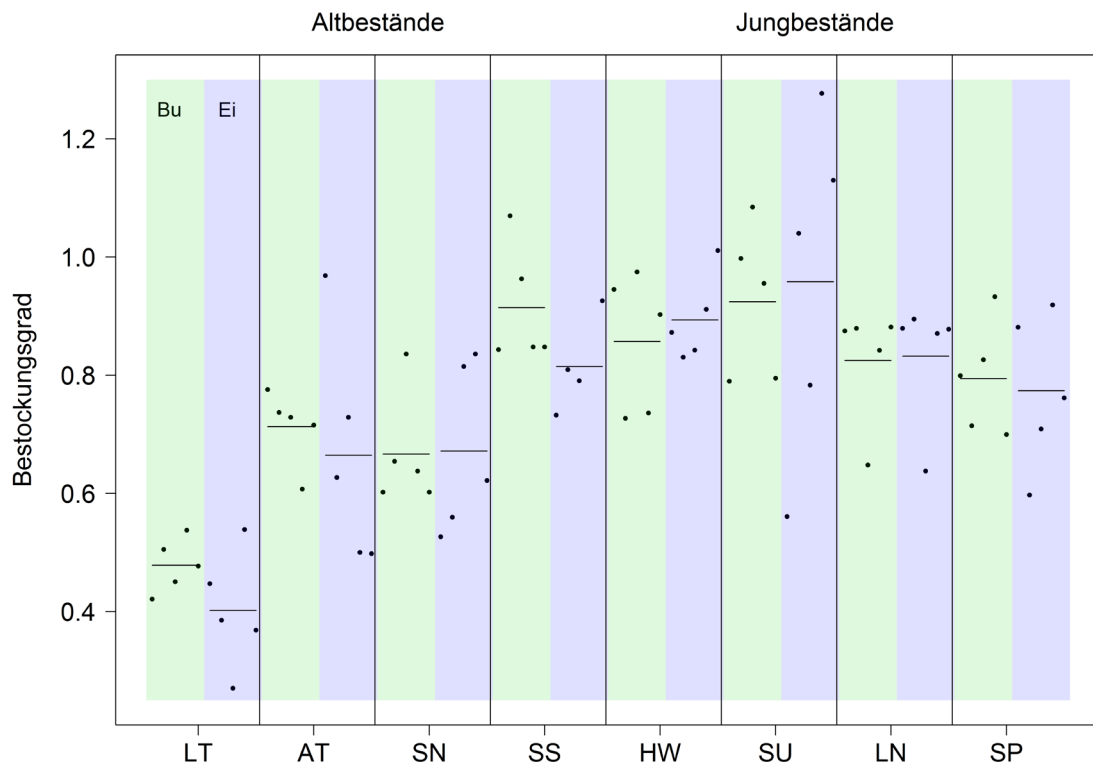


Abbildung 53: Bestockungsgrad der STO-BA-Kombinationen

Die Punkte stellen die baumindividuellen Bestockungsgrade dar, die Linien den mittleren Bestockungsgrad der STO-BA-Kombination.

Zwischen Buchen und Eichen bestand an den einzelnen Standorten kein signifikanter Unterschied im mittleren Bestockungsgrad.

Aufgrund der in den Beständen lediglich vorhandenen älteren Stöcke kann davon ausgegangen werden, dass zwischen 2003 und dem Einschlag der Untersuchungsbäume im Winter 2010/11 bzw. 2011/12 i.d.R. keine Durchforstungen in den Untersuchungsbeständen stattgefunden haben (Ausnahmen: Spielberg und Leonbronn). Aufgrund der in Abbildung 53 dargestellten Bestockungsgrade wird davon ausgegangen, dass auch im Trockenjahr 2003 keine grundsätzlich unterschiedliche Konkurrenzsituation aufgrund unterschiedlicher Bestandesdichten zwischen den beiden Baumarten vorhanden war. Für die Trockenstressreaktion im Radialzuwachs nach 2003 kann demnach hinsichtlich der Bestandesdichte von ähnlichen Ausgangsbedingungen für die beiden Baumarten ausgegangen werden.

Wie diese Situation um das Trockenjahr 1976 in den Beständen aussah, kann nicht mehr rekonstruiert werden. Die Untersuchungsbäume in den Jungbeständen waren 1976 ca. 25 Jahre alt. Nach den heute gültigen waldbaulichen Richtlinien in Baden-Württemberg finden in Buchen- und Eichenmischbeständen, bis auf extensive Eingriffe zur Begünstigung von wuchsunterlegenen Mischbaumarten und zur Entnahme von schädigenden Protzen im Herrschenden, vor diesem Alter in der Regel keine Eingriffe statt (LANDESBETRIEB FORST BADEN-

WÜRTTEMBERG, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2014). Noch in der Jungbestandspflegeleitlinie von 1980 war dagegen die Baumzahlverminderung bei einer Oberhöhe von 5 m beim Betriebszieltyp Buche in schneedruckgefährdeten Lagen und beim Betriebszieltyp Eiche generell vorgesehen (MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LÄNDLICHEN RAUM L. U. u. F. B.-W. A. L., 1980). Es muss also davon ausgegangen werden, dass in den Jungbeständen schon vor dem Trockenjahr 1976 stammzahlreduzierende Eingriffe stattgefunden haben. Diese Eingriffe waren i.d.R. gleichmäßig über die ganze Fläche verteilt, qualitativ gute Exemplare wurden unabhängig von der Baumart gefördert, wobei davon ausgegangen werden kann, dass bei ähnlicher Qualität der beiden Baumarten die Eiche vorgezogen wurde. Eine stärkere Freistellung der Eichen im Vergleich zu den Buchen vor 1976 erscheint jedoch unwahrscheinlich, da die Astreinigung der Bestände zu diesem Zeitpunkt noch in vollem Gange war und übermäßige Freistellungen deshalb sehr wahrscheinlich vermieden wurden. Die für diese Arbeit ausgewählten Untersuchungsbäume in den Jungbeständen haben also vor 1976 mit großer Wahrscheinlichkeit keine baumartenweise unterschiedliche Behandlung erfahren. Die Untersuchungsbäume aus den Altbeständen waren 1976 im Mittel zwischen 60 und 135 Jahren alt (vgl. Tabelle 4, Kapitel 3.6.1). Sie befanden sich damit entweder mitten in der Durchforstungsphase bzw. die ältesten Bestände schon im Übergang zur Vorratspflege. Darüber wie die Bestandesdichte und damit die Konkurrenzsituation in den Altbeständen im und nach dem Trockenjahr 1976 ausgesehen hat, können nur Vermutungen angestellt werden. Wahrscheinlich ist, dass die lichtbedürftigeren Eichen bei den bis dahin stattgefundenen Durchforstungsmaßnahmen stärker freigestellt wurden als die Buchen.

Die Auswahl von vorherrschenden, großkronigen Bäume beider Baumarten sollte sicherstellen, dass diese auch schon 1976 und 2003 zu den dominierenden Bestandesgliedern gehörten und damit ihren Radialzuwachs zwar nicht unbeeinflusst von den Nachbarbäumen, aber doch ohne starke unmittelbare Kronenkonkurrenz durch dieselben realisieren konnten. Damit kann davon ausgegangen werden, dass das Witterungssignal im Radialzuwachs dieser Bäume stärker ausgeprägt ist als in Bäumen geringerer sozialer Klasse. Dennoch kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass es sich bei den aktuell als vorherrschend angesprochenen Bäumen um „soziale Aufsteiger“ handelt, die vor 35 Jahren dem Kollektiv der mitherrschenden Bestandesglieder angehörten und deren Radialzuwachs damit stärker von der baumindividuellen Konkurrenzsituation beeinflusst wurde. Allerdings ist aus zahlreichen waldwachstumskundlichen Untersuchungen bekannt, dass solche Umsetzungen selten auftreten. Dies zeigt z.B. SPIECKER (1996, 39ff.) für die Eiche in nicht und verschieden stark durchforsteten Beständen oder KLÄDTKE (1997) für Z-baumorientiert durchforstete Buchenbestände.

Kritischer muss hinsichtlich der Auswahl vorherrschender Bäume hinterfragt werden, ob diese tatsächlich die Konkurrenzdynamik zwischen den beiden Baumarten und deren mögliche Veränderung aufgrund von Trockenstress widerspiegeln. Denkbar wäre, dass zeitlebens vorherrschende Bäume anders auf Trockenstress reagieren, als Bäume die nach der Einteilung von KRAFT (1884) zeitlebens beherrscht oder mitherrschend waren. So zeigt eine Untersuchung von MÉRIAN UND LEBOURGEOIS (2011) an 61 Standorten in Frankreich mit sechs verschiedenen Baumarten, dass herrschende und beherrschte Kiefern, Traubeneichen und Fichten mit gleicher Sensitivität auf Veränderungen der Temperatur und der Wasserbilanz reagieren. Bei den schattentoleranten untersuchten Buchen und Tannen haben die herrschenden Bäume dagegen sensibler auf Trockenstress reagiert als die Beherrschten. Hinsichtlich der Buche kommt VAN DER MAATEN (2012) zu einem ähnlichen Ergebnis. Er analysiert den Radialzuwachs von 54 auf unterschiedlichen Expositionen stockenden Buchen bei Tuttlingen (Baden-Württemberg) und kommt zu dem Schluss, dass Bäume der Kraft'schen Klassen 1-2 besonders empfindlich auf Trockenstress reagiert haben, während Bäume der Klasse 3 weniger anfällig waren. Für die Kiefer kommen MÄKINEN UND VANNINEN (1999) bei der Untersuchung in einem nicht

bewirtschafteten 76jährigen Bestand in Südfinnland zu anderen Ergebnisse als MÉRIAN UND LEBOURGEOIS. Sie finden bei den vorherrschenden Bäumen höhere EPS-Werte, und damit auch engere Witterungs-Wachstums-Beziehungen, als bei den mitherrschenden und beherrschten Bäumen, allerdings ist der Materialumfang mit vier Bäumen je Kollektiv in dieser Untersuchung relativ gering. Es ist also wahrscheinlich, dass beherrschte Individuen der Schattbaumart Buche andere Trockenstressreaktionen zeigen, als beherrschte Individuen der Lichtbaumart Eiche. In der Praxis dürfte in ca. 60 bis 80jährigen Beständen z.B. des Öfteren die Kombination: „vorherrschende Eiche und (noch) mitherrschende Buche“ auftreten (vgl. Kapitel 2.2.1). Inwiefern sich die Konkurrenzdynamik in diesen spezifischen Situationen aufgrund von Trockenstressereignissen verändert, kann anhand der hier vorgestellten Ergebnisse, die auf der ausschließlichen Auswahl von vorherrschenden Baumarten basieren, nicht beantwortet werden. Dennoch war die Auswahl vorherrschender Bäume aufgrund der vorstehend in diesem Kapitel dargestellten Zusammenhänge zwischen Radialzuwachs und Konkurrenz zielgerecht und notwendig. Letztlich muss der dargestellte Sachverhalt aber bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden und hervorgehoben werden, dass aufgrund der Auswahl der Untersuchungsbaume keine auf das Artniveau verallgemeinerbaren Aussagen beispielsweise zur langfristigen Dynamik der Konkurrenzverhältnisse aufgrund von Trockenereignissen zwischen den beiden Baumarten möglich sind. Dieses gilt umso mehr vor dem Hintergrund, dass die Auswahl der Untersuchungsstandorte nicht flächenrepräsentativ erfolgte, sondern modellbasiert, d.h. gezielt Bestände und Untersuchungsbaume ausgewählt wurden, um spezifische Wachstumsverhältnisse abzubilden.

Die relative Position der Konkurrenten am Hang beeinflusst das Wachstum der benachbarten Bäume in erheblichem Umfang. Konkurrenten die oberhalb des zu untersuchenden Baumes stehen haben dabei einen erheblich stärkeren Einfluss als solche unterhalb des Untersuchungsbaumes (MITSCHERLICH 1970, 22). Daneben spielt für das Wachstum von Bäumen am Hang deren absolute Lage aufgrund unterschiedlicher Standortseigenschaften eine große Rolle. So ist bei am Unterhang stehenden Bäumen von einer insgesamt besseren Wasserversorgung auszugehen (Hangzuschusswasser) als bei Bäumen, die am Oberhang stehen. Um den letztgenannten Effekt zu minimieren, wurden in der Regel Baumpaare von Buche und Eiche ausgesucht, die hangparallel zueinander standen. Unterschiede in der Konkurrenzsituation aufgrund unterschiedlicher Positionen der Konkurrenten am Hang konnten bei der Auswahl der Untersuchungsbaume jedoch nicht berücksichtigt werden. D.h. obwohl die Kollektive der untersuchten Buchen und Eichen auf Standortebene ähnliche Bestockungsgrade aufweisen, kann die tatsächliche Konkurrenzsituation aufgrund der Positionen der Konkurrenten am Hang verschieden gewesen sein. Aufgrund des insgesamt höheren Bestockungsgrades in den Jungbeständen, wird dieser Effekt vor allem dort eine gewisse Rolle spielen. Vermutlich gleichen sich die positionsabhängigen Unterschiede für das Gesamtkollektiv aller untersuchten Buchen und Eichen jedoch aus. Auf der Ebene des einzelnen Untersuchungsstandorts können Unterschiede jedoch zu ungewollten Verzerrungen führen.

Sowohl bei den Buchen- als auch bei Eichen-Untersuchungsbaumen waren ganz unterschiedliche Mischungssituationen vorhanden. Es gab Buchen, die nur von Konkurrenten der eigenen Art umgeben waren, andererseits gab es auch Buchen die komplett von Eichen oder anderen Mischbaumarten umgeben waren. Dieselbe Situation war vice versa bei den untersuchten Eichen vorzufinden. Diese baumindividuellen Mischungsverhältnisse haben sich seit dem Trockenjahr 2003 vermutlich kaum geändert. 1976 könnten sie aufgrund der zwischenzeitlich erfolgten Durchforstungen deutlich anders, vermutlich aber ähnlich heterogen, gewesen sein. Von einer Beeinflussung der Trockenstressreaktion durch die baumindividuelle Mischungssituation muss in Bu-Ei-Mischbeständen spätestens seit den Untersuchungen von PRETZSCH ET AL. (2013) ausgegangen werden (vgl. Kapitel 5.3.2.4). Bezüglich der Heterogenität der Mischung sind die Verhältnisse im Kollektiv der Buchen im Vergleich zum Kollektiv Eichen jedoch

ähnlich. Bei 60 % der untersuchten Buchen und 75 % der Eichen waren von den sechs aufgenommenen nächsten Konkurrenten einer bis drei von derselben Baumart, also auch Buchen oder Eichen. Umgekehrt waren damit mindestens drei bis fünf der aufgenommenen Konkurrenten von einer anderen Baumart. Es herrschte also in beiden Kollektiven eine typische einzelbaumweise Mischung vor.

Zusammenfassend kann bezüglich der Auswahl der Untersuchungsbäume festgehalten werden, dass aus der Analyse der Höhenzuwächse nach den Trockenjahren direkte Rückschlüsse auf die Konkurrenzdynamik zwischen den beiden Baumarten für die untersuchten Standorte gezogen werden können. Schwieriger ist dies bei der aus dem Radialzuwachs abgeleiteten Trockenstressreaktion bzw. den Trockenstresskennzahlen. Vor allem bezüglich der Trockenstressreaktion 1976 bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der damals vorhandenen konkreten Konkurrenzsituation, so dass aus den Ergebnissen der Trockenstresskennzahlen um 1976 nicht uneingeschränkt auf eine generelle Veränderung der Konkurrenzverhältnisse aufgrund von Trockenstressereignissen geschlossen werden kann. Im Trockenjahr 2003 sind die Unsicherheiten hinsichtlich der Konkurrenzsituation jedoch geringer, so dass die Ergebnisse aus den Trockenstresskennzahlen 2003 auch im Hinblick auf eine durch Trockenjahre mögliche Beeinflussung der Konkurrenzverhältnisse zwischen den beiden Baumarten interpretiert werden können. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese Interpretation nur für vorherrschende Bäume auf den untersuchten Standorten nicht aber für ganze Bestände oder die Konkurrenzdynamik zwischen Buchen und Traubeneichen allgemein gelten können.

5.1.2 Diskussion zur Anzahl der Untersuchungsbäume

Um abgesicherte Informationen zu den Witterungs-Wachstums-Beziehungen zu erhalten, empfehlen MERIAN ET AL. die Anzahl der Untersuchungsbestände zu erhöhen, wenn die Interserienkorrelation innerhalb der Bestände höher ist als die Interserienkorrelation zwischen den Beständen. Berechnet auf der Basis der mit 20jährigem Spline trendbereinigten Radialzuwächse für den gemeinsamen Überlappungszeitraum 1962-2010, liegt die Interserienkorrelation innerhalb der untersuchten Bestände sowohl für die Buchen als auch für die Eichen im Mittel bei ca. 0.70 (vgl. Tabelle 5). Die Interserienkorrelation zwischen den Beständen ist deutlich niedriger, sie liegt für Buche bei 0.41 und Eiche bei 0.40. Damit kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Untersuchungsbäume pro Bestand ausreichend war bzw. detailliertere Aussagen zu den Witterungs-Wachstums-Beziehungen nur mit einer Erhöhung der Anzahl der Untersuchungsbestände insgesamt möglich gewesen wären.

Es wurde bereits in Kapitel 3.4.3.1 darauf hingewiesen, dass hinsichtlich des *Expressed Population Signals* ein Schwellenwert von 0.85 als ausreichend angesehen wird, um abgesicherte Aussagen hinsichtlich der Witterungs-Wachstums-Beziehungen auf der Grundlage von monatlichen Witterungs- oder Bodenwasserhaushaltsdaten und trendbereinigten Jahrringzuwächsen aufstellen zu können (WIGLEY ET AL. 1984). Der genannte Schwellenwert wurde, bis auf eine Ausnahme, in der vorliegenden Arbeit für alle Teilkollektive erreicht bzw. überschritten. Leidglich für die Eichen am Standort Spielberg (SPEi) wird der Schwellenwert knapp unterschritten (vgl. Tabelle 5). BRIFFA und JONES (1990) weisen darauf hin, dass die notwendige Anzahl von Untersuchungsbäumen um den Schwellenwert von 0.85 zu erreichen sehr stark von den wachstumslimitierenden Faktoren abhängt. So sei für Koniferen unter den semiariden Bedingungen der westlichen USA eine Anzahl von vier Bäumen ausreichend, während es bei geringen Interserienkorrelationen von ca. 0.2 z.B. bei laubwerfenden Bäumen in Großbritannien 25 Untersuchungsbäume bedürfe, um den EPS-Wert von 0.85 zu erreichen (BRIFFA, JONES, 1990, 147). In einer Simulationsstudie untersuchen MÉRIAN ET AL. (2013) den Einfluss der Anzahl von Untersuchungsbeständen und Untersuchungsbäumen auf die Qualität der Witterungs-Wachstums-Beziehungen anhand eines Datensatzes von 84 Beständen mit jeweils zehn untersuchten, vorherrschenden korsischen Kiefern (*Pinus nigra* Arnold ssp. *laricio*

Poiret var. *Corsicana*). Der Schwellenwert von 0.85 wird in diesem Datensatz bei Bestandes-/Baumkombinationen von z.B. 6/8 oder 8/3 erreicht. Trotzdem kommen die Autoren zu dem Schluss, dass, wenn hinsichtlich Korrelationskoeffizient, Standardabweichung, und Signifikanz der Witterungs-Wachstums-Beziehungen eine Grenze von 50 % der Werte angenommen wird, welche aufgrund der Analyse des maximalen Datensatzes (84/10) erreicht wurden, ein EPS-Wert von 0.95 anzustreben wäre. Um einen EPS-Wert von 0.95 zu erhalten, sei in dem korsischen Datensatz aber beispielsweise eine Anzahl der zu untersuchenden Bestandes-/Baumkombinationen von 30/6, 40/3 oder 45/2 notwendig. Des Weiteren weisen die Autoren darauf hin, dass die Qualität der Witterungs-Wachstums-Beziehungen bei höheren EPS-Werten verbessert werde, heben jedoch auch hervor, dass die Zusammenhänge nicht linear seien.

Anhand des untersuchten Materials war es möglich signifikante Unterschiede im Höhenzuwachs nach den Trockenjahren und anhand der Trockenstresskennzahlen im Radialzuwachs zwischen den Kollektiven nachzuweisen. Mit einer größeren Anzahl von Untersuchungsbäumen pro Bestand wären gegebenenfalls weitere Unterschiede als signifikant nachweisbar gewesen. Sowohl die Fehlerbereiche im Verlauf der Radialzuwächse in den unterschiedlichen Kollektiven (z.B. in Abbildung 40 oder Abbildung 41), als auch die Relation der Fehlerbalken zu den Kurvenniveaus (z.B. in Abbildung 49 und Abbildung 50) zeigen jedoch, dass durch eine Vergrößerung der Anzahl der Untersuchungsbäume pro Bestand keine Änderung der generellen Muster zu erwarten wäre. Darüber hinaus wäre eine Vergrößerung der Anzahl der Untersuchungsbäume in vielen der ausgewählten Bestände nur mit Abstrichen bezüglich der hangparallelen Position der Baumartenpaare zueinander, der vorherrschenden Stellung der Untersuchungsbäume oder der Anforderung an die auszuwählenden Standortseinheiten möglich gewesen.

5.1.3 Diskussion zur Eignung der Bestände vor dem Hintergrund der klimastatistischen Analysen

Die ausgewählten Bestände bilden den gewünschten Wasserverfügbarkeitsgradienten ab. Die in Kapitel 3.1.2 dargestellte Reihung der Untersuchungsstandorte zeigt, dass die Ergebnisse aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell auf Bestandesebene plausibel sind. Bezogen auf das Verbreitungsgebiet von Buche und Traubeneiche in ganz Mitteleuropa liegen die Untersuchungsbestände allerdings lediglich in einem mittleren Bereich. Nach der Klimahülle von KÖLLING (2007) kommt die Buche in einem Bereich von ca. 475 bis ca. 1300 mm durchschnittlichem Jahresniederschlag und 3.5 bis 13.5°C Jahresdurchschnittstemperatur vor. Traubeneiche ist in einem Bereich von ca. 450 bis 1300 mm Jahresniederschlag und 4 bis 14°C Jahresdurchschnittstemperatur verbreitet. Die jährlichen Niederschlagssummen liegen an den Untersuchungsstandorten im Bezugszeitraum der Klimanormale (1961-1990) zwischen 750 mm (Sternenfels) und 1400 mm (Lautenbach) (vgl. Anhang 7) und damit weit von den Trockenheitsgrenzen der beiden Baumarten entfernt. Auch die Jahresdurchschnittstemperaturen sind an den ausgewählten Standorten mit 8.5 bis 9.5°C keinesfalls in dem Bereich der o.g. Extremwerte anzusiedeln. Ebenfalls bezogen auf die Klimanormalperiode liegen die Niederschläge in der Vegetationszeit an den Untersuchungsstandorten zwischen 430 mm (Sternenfels) und 710 mm (vgl. Kapitel 3.5.1). HERTEL ET AL. (2004) kommen u.a. aufgrund der Analyse der Blattmorphologie und der Neubildungsrate von Feinwurzeln in Buchenaltbeständen auf Sandböden Mittel- und Ostdeutschlands zu dem Schluss, dass selbst bei Niederschlägen von lediglich 260 mm in der Vegetationsperiode oder 500 mm im Jahr „Niederschlagsarmut ... nicht der Hauptfaktor für die heutige (und potentielle natürliche) Verbreitung der Buche in Mittel- und Ostdeutschland sein kann.“ (ebenda, S. 35f). Im Vergleich zu den bei HERTEL ET AL. analysierten Beständen, müssten die für diese Arbeit ausgewählten Bestände als gut wasserversorgt angesehen werden. Im Sinne der traditionellen dendrochronologischen Forschung bei der davon ausgegangen wird, dass die Schwankungen im Radialzuwachs von

Bäumen v.a. durch die limitierenden Faktoren geprägt sind, stellen die untersuchten Bestände im Hinblick auf das Witterungssignal sicherlich keine „optimale“ Auswahl dar. Dendroklimatologische Arbeiten fokussieren deshalb auf die Auswahl von Bäumen am Rande ihres Verbreitungsgebietes (FRITTS 2001), da dort davon ausgegangen wird, dass einzelne Faktoren wachstumslimitierend wirken. Für die Frage der Trockenstress-Resistenz ist die bereits vorhandene Wachstumslimitierung durch die Aridität des Standorts jedoch sekundär. Dass die Bäume an der trockenen Verbreitungsgrenze dabei mit einer hohen Toleranz gegenüber extremen Trockenereignissen reagieren, entspricht zwar den Vorstellungen einer entsprechenden Adaption, kann aber aufgrund von erreichten Schwellenwerten auch gerade nicht der Fall sein. Andererseits können Bäume auf gut wasserversorgten Standorten aufgrund ihrer Reserven möglicherweise kaum Probleme mit Trockenstress bekommen, oder gerade deshalb sensitiv reagieren, weil sie an periodisch auftretenden Wasserstress einfach nicht angepasst sind. So zeigen WEBER ET AL. (2013) am Beispiel von Buchen, die an unterschiedlich wasserversorgten Standorten in der Schweiz beprobt wurden, dass gerade die Buchen auf den feuchteren Standorten sensitiver gegenüber Trockenstress waren, als diejenigen von den trockenen Standorten.

5.1.4 Diskussion der Eignung der Bestände vor dem Hintergrund der genetische Variabilität

Die genetischen Untersuchungen der Eichen haben bestätigt, dass es sich bei dem Untersuchungsmaterial ausschließlich um Traubeneiche handelt und diese bis auf den Standort Sulzburg und jeweils einen Untersuchungsbaum an den Standorten Heuweiler und Sternenfels Nordhang demselben eiszeitlichen Refugium (Balken) entstammen (vgl. Kapitel 4.3). Abweichungen der Trockenstresskennzahlen (Resistenz, Recovery und Resilienz) aufgrund unterschiedlicher eiszeitlicher Refugialgebiete wurden anhand von Punktdiagrammen (vgl. Anhang 19) geprüft. Hinsichtlich der Trockenstressreaktionen der Traubeneichen konnte weder für den Standort Sulzburg noch für die beiden Einzelbäume eine im Vergleich zu den übrigen Untersuchungsstandorten/-bäumen auffällig abweichende Reaktion festgestellt werden. Die Ergebnisse der genetischen Analyse der adaptiven Marker (Kern-Mikrosatelliten) wurden ebenfalls in Punktdiagrammen den Trockenstresskennzahlen gegenübergestellt. Auch hier zeigen sich keine Zusammenhänge.

Die genetische Variabilität der Buchen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Es ist davon auszugehen, dass die eingeschlagenen Buchen aus Naturverjüngung entstanden sind und es sich damit um autochthones Material handelt. Mehrere Autoren bestätigen die generell hohe genetische Vielfalt innerhalb von Buchenbeständen, aber auch die geringen genetischen Unterschiede zwischen verschiedenen Buchenherkünften (z.B. RAJENDRA ET AL. 2014; KONNERT ET AL. 2014). Darüber hinaus weist BOLTE (2005) darauf hin, dass bezüglich der genetischen Ausstattung der Buche bislang unbekannt ist, welche Genorte für Unterschiede in der Trockenstressresistenz verantwortlich sind. Die deutlich größere Streuung aller Trockenstresskennzahlen der untersuchten Buchen im Vergleich zu denen der Eichen in beiden Trockenjahren (vgl. Abbildung 54) kann ihre Ursache auch in der hohen genetischen Vielfalt der Buchen haben. Daneben können andere Faktoren eine Rolle spielen, so z.B. nicht auszuschließende kleinstandörtliche Unterschiede.

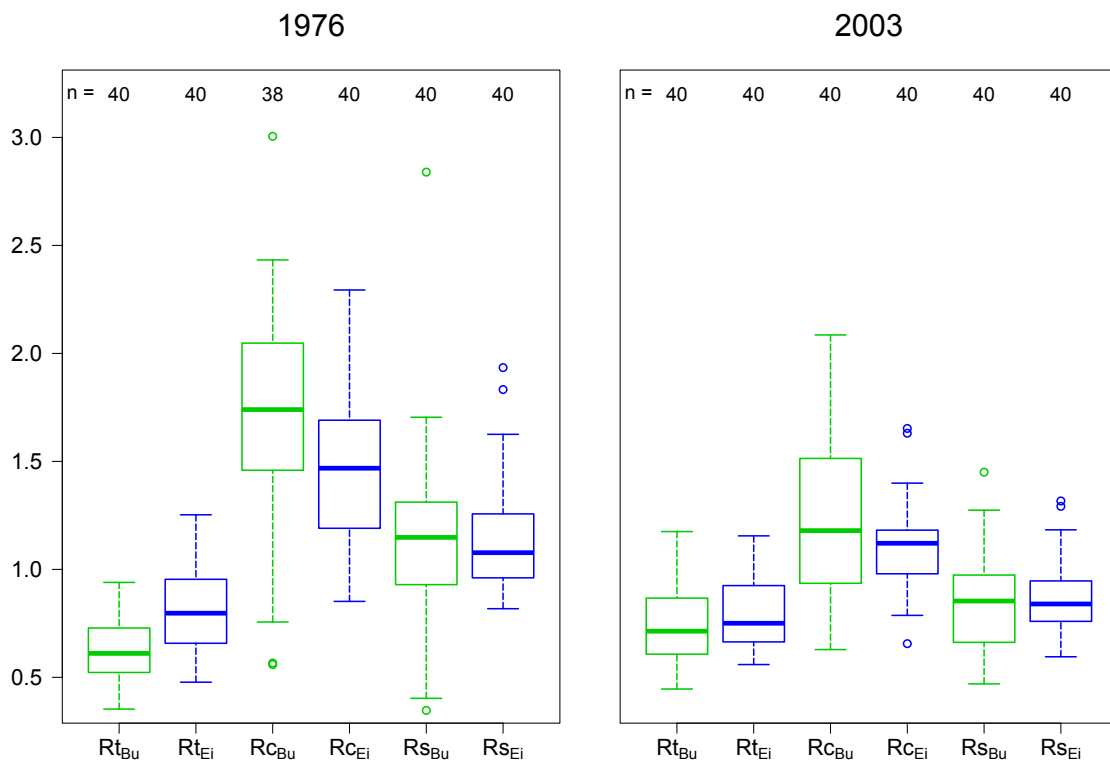


Abbildung 54: Boxplots der Trockenstresskennzahlen für die Trockenjahre 1976 und 2003

Dargestellt sind links die Resistenz- (Rt), Recovery (Rc) und Resilienzwerte von 1976 und rechts von 2003. Datengrundlage für die Berechnung dieser Werte sind die Radialzuwächse (Absolutwerte auf 1.3 m Höhe) der Buchen (grün) und Eichen (blau), Referenz- und Erholungszeiträume wie in Kapitel 3.4.3.5 beschrieben. Für die Darstellung der $R_{C_{Bu}}$ -Werte im Jahr 1976 wurden die beiden außergewöhnlichen Werte der Untersuchungsbäume LNBu Nr. 3 (=4.3) und SPBu Nr. 3 (=6.2) aus Darstellungsgründen gelöscht. Obere und untere Begrenzung der Box durch oberes und unteres Quartil, d.h. innerhalb der Box liegen 50 % der Werte der jeweiligen Trockenstresskennzahl. Die Whisker (Antennen) reichen bis zum 1.5-fachen des Interquartilabstandes, Werte außerhalb dieses Bereichs sind als Kreise dargestellt. Die Trockenstresskennzahlen der Buchen haben eine größere Streuung als die der Eichen.

5.2 Diskussion der Methoden

5.2.1 Diskussion der Ermittlung des Höhenwachstums und des Höhenzuwachses

Die im Wald angesprochenen Triebbasisnarben wurden im Labor anhand der Anzahl der an den Querschnitten ermittelten Jahrringe überprüft. Sowohl bei den Buchen als auch bei den Traubeneichen traten Abweichungen zu den Felderhebungen auf. Diese sind entweder auf im Feld übersehene Triebbasisnarben oder auf angesprochene, „unechte“ Triebbasisnarben zurückzuführen. Unechte Triebbasisnarben können durch Veränderungen der Rindenstruktur entstehen, die von Johannistrieben, Triebverletzungen oder -abbrüchen, Verzweigungen oder anderen Einflüssen herrühren. Diese „unechten“ Triebbasisnarben sind äußerlich kaum von „echten“ Triebbasisnarben zu unterscheiden. Da solche Fehlinterpretationen im Feld zu einer Fehldatierungen in der gesamten Messkette führen, hat sich die Nachkontrolle im Labor als absolut notwendig und zielführend erwiesen.

Der Vergleich der Höhenzuwächse nach dem Trockenjahr 2003 und nach dem Trockenjahr 1976 war nur möglich, aufgrund der engmaschigen Entnahme der Kronenscheiben. Spaltversuche entlang des Marks waren ebenso wenig erfolgreich, wie Analysen mittels eines Computer-Tomographen (SAUTER ET AL. 2013). Die Vermessung/Auszählung der Jahrringe an den Kronenscheiben mittels halbautomatischer Bildanalyse hat sich dagegen bewährt. Da für diese Fragestellung eine Vermessung der Jahrringe nicht notwendig erscheint, könnte das manuelle

Auszählen als ausreichend angesehen werden. Gerade bei den Buchenscheiben der trockenen Standorte hat sich eine Dokumentation und das parallel zum Messen erfolgte Cross-Dating der Scheiben jedoch als sinnvoll erwiesen, um die Jahrringanzahl sicher und eindeutig bestimmen zu können. Bezüglich der Abgrenzung des innersten Jahrrings vom Mark bei der Traubeneiche mussten spezielle Erhebungen vorgeschaltet werden (vgl. (GEBHART 2012).

5.2.2 Diskussion der Ermittlung des Radialzuwachses

Der Radialzuwachs wurde mittels halbautomatischer Bildanalyse entlang von acht bzw. vier Radien auf den Stammscheiben ermittelt. Hierzu wurde das an der Professur für Waldwachstum entwickelte Programm WOODSCAN (Version 6.4.8) genutzt. Das Programm bietet die Möglichkeit baumartenspezifische Einstellungen zur besseren Detektion der Jahrringgrenzen vorzunehmen. Trotz dieser Einstellungen war es dem Programm vor allem bei den Buchenscheiben der trockeneren Südhänge in vielen Fällen nicht möglich die Jahrringgrenzen sicher zu setzen. Auch die manuelle Korrektur fehlender Jahrringgrenzen direkt am Bildschirm anhand des digitalen Fotos war bei diesen Buchen nur in begrenztem Umfang möglich. Zwar bietet das Programm die komfortable Möglichkeit Referenzkurven und -bilder als Vergleich hinzuzuziehen, bei mehreren aufeinanderfolgenden schwer oder kaum zu erkennenden Jahrringgrenzen können die fehlenden Grenzen jedoch nur unter Billigung größerer Unsicherheiten anhand der Referenzen ergänzt werden. Im Rahmen der Jahrringvermessung an den Buchen wurden deshalb auch andere Meß-Systeme geprüft, so z.B. die Vermessung mit dem LINTAB™ Meß-System und der Software TSAP-Win™ der Fa. Rinntech. Dieses System bietet den Vorteil, dass direkt unter einem Stereomikroskop gearbeitet werden kann und an Stellen mit unklaren Ringgrenzen die Vergrößerung entsprechend angepasst werden kann. Für die Vermessung größerer Scheiben (mit über 50 cm Durchmesser), ist dieses System jedoch aufgrund der geringen Abmessungen des Messtisches wenig geeignet. Daneben erfolgt keine Dokumentation der gesetzten Jahrringgrenzen, z.B. über die Archivierung von digitalen Bildern, so dass bei etwaigen Fehlmessungen der gesamte Radius neu vermessen werden muss. Eine weitere Option die geprüft wurde, war das Einscannen der Scheiben und die anschließende Analyse mit dem Programm WINDENDRO (Regent Instruments Inc.). Die Auflösung und Abmessung der an der Professur vorhandenen Scanner (A4 mit 3.000 dpi), reichte jedoch nicht aus, um die großen Stammscheiben vermessen zu können bzw. um die Jahrringgrenzen am digitalen Foto besser erkennen zu können. Auch die Installation einer höher auflösenden Kamera für das Abfotografieren der Radien im bestehenden System wurde nach eingehender Prüfung verworfen. Einerseits wären, aufgrund der geänderten Bildzuschnitte, dann umfangreiche Neuprogrammierungen in WOODSCAN notwendig gewesen. Andererseits stellt auch bei höher aufgelösten und stärker vergrößerten Bildern die Oberflächenpräparation bzw. -qualität der Stammscheiben eine nicht zu unterschätzende Komponente für das Erkennen der Ringgrenzen dar. Obwohl die Buchen-Scheiben stufenweise mit immer feinerer Körnung und im letzten Schliff sorgfältig mit Schleifpapier der Körnung 240 geschliffen wurden, entstehen an der Holzoberfläche Strukturen, die ein Erkennen der Jahrringgrenzen erschweren, so z.B. durch eingedrückte und verfüllte Frühholzgefäße. Letztlich können diese Strukturen nur durch schneidende Techniken vermieden werden. Dafür steht an der Professur z.B. eine Ultrapräzisionsfräse zur Verfügung, allerdings ist deren Einsatzbereich auf Proben mit einer Abmessung von maximal 16 x 50 cm limitiert. Aus Effizienzgründen wurde jedoch auf eine Zerteilung der Stammscheiben verzichtet. Kritische Stellen im entsprechenden Radius, d.h. dort wo die Jahrringgrenzen kaum zu erkennen waren, wurden bereits im Vorfeld des Abfotografierens mittels Rasierklinge und Kreide manuell präpariert und die Jahrringe mit einem spitzen Bleistift unter dem Stereomikroskop markiert. Diese Vorgehensweise und der laufende Vergleich während der Messung mit den Referenzkurven stellten eine hohe Qualität der Jahrringmessungen sicher. Als weiterer Schritt in der Qualitätskontrolle wurden alle

gemessenen Radien einer Scheibe in einem Liniendiagramm dargestellt und deren synchroner Verlauf visuell geprüft. Hierzu wurde das ebenfalls an der Professur für Waldwachstumskunde entwickelte Programm STAMA (Version 4.7.1) verwendet. Mit diesem Programm konnten in einem abschließenden Schritt auch die quadratischen Mittelwerte der vermessenen Radien und die entsprechenden Querschnittsbilder für jeden Stamm erzeugt werden.

5.2.3 Diskussion der Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells

Die Abweichungen im Profil Nr. 3 (Abbildung 21) am Standort Spielberg, also ein höherer pH-Wert und eine höhere Basensättigung, werden aufgrund der im Profil vorhandenen Bodenart und Färbung auf hoch anstehende karbonathaltige Mergeltonschichten zurückgeführt. Basensättigung und pH-Wert fließen nicht als Eingangsparameter in die Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells mit ein. Die weiteren Ergebnisse aus dieser Profilaufnahme wurden deshalb, ungeachtet der Besonderheiten in der Bodenchemie, trotzdem für die Modellerstellung genutzt.

Insgesamt sind die modellierten täglichen Werte von Wassergehalt und Matrixpotenzial plausibel. Dies trifft sowohl für den Vergleich der Standorte untereinander mit den über den gesamten analysierten Zeitraum aggregierten Werten, also auch für den Vergleich des Verlaufs der Tageswerte in einzelnen Jahren zwischen den Standorten oder zwischen einzelnen Jahren am selben Standort zu (Ergebnisse nicht gezeigt). Vor allem die Jahresverläufe geben wertvolle Hinweise zum Unterschied der Trockenheitsausprägung. So wird daraus deutlich, dass die Trockenheit 1976 von wesentlich kürzerer Dauer war als 2003 (vgl. Abbildung 30). Auch die Unterschiede in den Jahren nach der Trockenheit werden anhand der entsprechenden Jahresverläufe deutlich, was zur Erklärung der sehr unterschiedlichen Erholungsreaktionen beiträgt.

Die tägliche Niederschlagssumme, welche als ein Eingangsparameter in das Bodenwasserhaushaltsmodell einfluss (vgl. Kapitel 3.3.7), wurde für den Analysezeitraum (1971-2010) mit den monatlich aufgelösten DWD-Griddaten verglichen (Ergebnisse nicht gezeigt). An sechs der acht Untersuchungsstandorte lagen die Abweichungen bei der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme zwischen 1 und 4 %. Lediglich am Standort Spielberg war die jährliche Niederschlagssumme der aufsummierten Tageswerte um 12 % geringer als die der aufsummierten Monatswerte, am Standort Heuweiler betrug diese Abweichung 7 %. Ob die 1 km x 1 km Grid-Daten des DWD oder 50 m x 50 m Grid-Daten der Universität Hamburg die Situation vor Ort treffsicherer widerspiegeln, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden. Da die Abweichungen jedoch insgesamt sehr gering waren und an den beiden genannten Standorten vor allem auf größere Abweichungen im Winterhalbjahr begrenzt waren, wird hinsichtlich der Analyse der Witterungs-Wachstums-Beziehungen von geringen Auswirkungen aufgrund der unterschiedlichen Datenquellen ausgegangen.

Die Ergebnisse des Bodenwasserhaushaltsmodells beziehen sich auf die spezielle Situation am jeweiligen Bodenprofil. Pro Standort wurden drei Bodenprofile angelegt, um die Streuung am Untersuchungsplot wiederzugeben. Bereits die Unterlagen der Standortkartierung gaben Hinweise auf die Heterogenität der Bodenbeschaffenheit am jeweiligen Standort. Diese Heterogenität und die Lage der Untersuchungsbäume wurden bei der Anlage der Bodenprofile berücksichtigt und spiegeln sich in den Ergebnissen des Modells wieder. So liegt beispielsweise das Profil Nr. 3 am Standort Leonbronn in der Standortseinheit „mäßig frischer Ton“, während die Profile Nr. 1 und Nr. 2 an diesem Standort in der Einheit „mäßig frischer Sandhang“ liegen (vgl. Anhang 1). Die daraus resultierende geringere nutzbare Feldkapazität von Profil Nr. 3 wird aus Abbildung 25 ersichtlich. Schließlich zeigen sich die Unterschiede in den drei Profilen im unterschiedlichen Verlauf bzw. im Standardfehler des Verlaufs der mittleren Matrixpotenzialwerte, wie sie im Anhang 8 dargestellt sind.

Die detaillierten Ergebnisse aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, dass diese Ergebnisse keiner realen Messreihe, sondern einer retrospektiven Simulation entstammen. Trotz aller Sorgfalt bei der Modellerstellung, mussten verschiedene Eingangsparameter geschätzt werden, so z.B. der Bestockungsgrad in der Vergangenheit oder die Durchwurzelung unterhalb der Profilsohle. Über in die Profilsohle getriebene Bohrstöcke wurde versucht Aussagen zur Bodenart in größerer Tiefe abzuleiten, dies gelang bei den stark steinigen Profilen im Schwarzwald jedoch meist nicht. Letztlich wurde die Durchwurzelung in den Bodenschichten unterhalb der Profilsohle bis zu einer Tiefe von 3 m (Schwarzwald) bzw. 2 m geschätzt bzw. anhand der Durchwurzelung im untersten Bodenhorizont extrapoliert (vgl. Kapitel 3.3.7). Es ist jedoch bekannt, dass z.B. die Eiche einzelne Wurzeln bis in weitaus größere Tiefen ausbilden kann. Welche Bedeutung diese i.d.R. geringe Anzahl von Wurzeln in großen Tiefen allerdings für die Wasserversorgung von älteren Bäumen haben, ist noch nicht eindeutig geklärt. Letztlich werden die beiden mit LWF-BROOK-90 berechneten Wasserhaushaltsgrößen (Matrixpotenzial und Wassergehalt) jedoch als Mittelwert für die obersten 60 cm der Bodenmatrix angegeben, d.h. die Durchwurzelung in den unteren Bodenhorizonten spielt im Modell nur für die Berechnung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum eine Rolle. Deren Einfluss auf die Ausgabegrößen ist, z.B. im Vergleich zum Niederschlag, jedoch relativ gering.

5.2.4 Diskussion zum Konzept der Witterungs-Wachstumsbeziehungen

Im Rahmen von vielen dendroklimatologischen Untersuchungen werden (trendbereinigte) Jahrringzuwächse mit Monatswerten meistens von Temperatur und Niederschlag, mit monatlichen Bodenwasserdaten oder mit sogenannten monatlichen Trockenheitsindices korreliert oder mittels Regressionsanalysen verknüpft. Bekannte Trockenheitsindices sind z.B. der *Palmer Drought Severity Index*, PDSI (PALMER 1965) oder der *Standardized Precipitation Index*, SPI (MCKEE ET AL. 1993). Eine kompakte Darstellung dieser Trockenheitsindices im Hinblick auf das Wachstum von Bäumen bietet METTE ET AL. (METTE ET AL. 2011). Sowohl mit den Bodenwasserdaten als auch den Trockenheitsindices wird versucht aus den Witterungs- und ggf. Bodendaten einen integrierten, mit dem Pflanzenwachstum letztlich stärker zusammenhängenden Wert abzuleiten, als dies einzelne oder die Kombination von Witterungsparametern tun. Die Verwendung solcher aggregierten Trockenheitsindices hat auch den Vorteil, dass die Anzahl an Prädiktoren und damit häufig auch das Ausmaß an Multikollinearität in Regressionsmodellen verringert werden kann.

Auf das Problem der Abgrenzung von Monatsdaten bei den letztlich vorhandenen kontinuierlichen Zeitreihen der Witterungs- oder Trockenheitsdaten wurde bereits in Kapitel 3.4.3.4 eingegangen. Die Ansätze zur Trendbereinigung und die damit einhergehende mögliche Abschwächung wichtiger Wachstumssignale wurde in Kapitel 3.4.3.2 thematisiert.

Trotz der genannten Schwierigkeiten wurden und werden Witterungs-Wachstums-Beziehungen für viele Baumarten aufgestellt bzw. gewinnen vor dem Hintergrund der prognostizierten Klimaveränderungen zunehmend an Bedeutung. Für dendroklimatologische Untersuchungen werden zumeist fünf bis 20 Bäume pro Untersuchungsstandort mit ein bis zwei Bohrkernen pro Baum beprobt. Die entsprechenden Witterungsvariablen werden oft von nahegelegenen meteorologischen Stationen übernommen oder von im Internet frei verfügbaren Datenbanken heruntergeladen. So stellt z.B. die Climate Research Unit (CRU) der University of East Anglia, Norwich einen Datensatz u. a. mit monatlichen Niederschlagsdaten über den weltweiten Landflächen im 50 km x 50 km Raster für den Zeitraum 1900 bis 1998 zur Verfügung (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/precip/>).

5.2.5 Diskussion zum Konzept der Trockenstresskennzahlen

Die Analyse anhand der Trockenstresskennzahlen erleichtert sowohl den Vergleich zwischen den beiden Baumarten, den verschiedenen Standorten und Kollektiven, als auch zwischen den beiden analysierten Trockenjahren. Vor allem der letztgenannte Vergleich ist, trotz der sorgfältigen Auswahl von Referenz- und Erholungszeiträumen, nur von begrenzter Aussagekraft, da die tatsächlichen Verläufe der Trockenheit bzw. der Matrixpotenziale in den beiden betrachteten Trockenjahren unterschiedlich waren (vgl. Abbildung 30), ebenso wie die Witterungsbedingungen in den jeweiligen Erholungszeiträumen (vgl. Abbildung 31) und u.U. auch die Konkurrenzsituation (vgl. Kapitel 5.1.1).

Die Länge der Referenz- und Erholungszeiträume wurde nach objektiven Kriterien festgelegt, dennoch stellt vor allem die Länge des festgelegten Erholungszeitraumes lediglich eine Näherung dar und entspricht nicht unbedingt der tatsächlichen Erholungsphase der Einzelbäume. Der Erholungszeitraum wurde aufgrund des Verlaufs der indexierten Mittelwerte aller Bäume (n=40) einheitlich auf zwei (1976) bzw. vier (2003) Jahre festgelegt (vgl. Abbildung 15). Eine Überprüfung auf Ebene der STO-BA-Kombination ergab, dass die ermittelten Erholungszeiträume auch auf dieser Ebene (n=5) plausibel sind (Grafiken nicht gezeigt). Dennoch kann es für den Einzelbaum aufgrund von z.B. kleinstandörtlichen oder genetischen Unterschieden andere Erholungszeiträume gegeben haben. Der Zuwachsrückgang nach Ablauf des festgelegten Erholungszeitraumes muss für den Einzelbaum nicht notwendigerweise das Ende der baumindividuell realisierten Erholungsphase bedeuten. Dieser kann auch durch ein weiteres Stressereignis ausgelöst sein, ohne dass die durch das Trockenjahr bedingte Erholungsphase bereits beendet wäre. Allerdings haben beide Baumarten im Mittel zum Ende des festgelegten Erholungszeitraumes, also 1978 und 2007, das Referenzniveau wieder überschritten, so dass zumindest für den Radialzuwachs in 1.3 m Höhe von einem tatsächlichen Ende des Erholungszeitraumes gesprochen werden kann. Letztlich kann die methodische Schwäche der Trockenstresskennzahlen, vor allem auch mit Blick auf eine umfassende Trockenstressreaktion des gesamten Baumes, nicht aufgelöst werden. In der vorliegenden Untersuchung haben beide Baumarten im Verlauf ihrer Radialzuwachsserien auf allen analysierten Stammhöhen sehr ähnlich reagiert, so dass die im Erholungszeitraum erreichten Niveauunterschiede für eine Unterscheidung zwischen Buchen und Eichen entscheidend sind. Diese Niveauunterschiede werden durch die Trockenstresskennzahlen deutlich herausgearbeitet.

PRETZSCH ET AL. (2013) wenden ebenfalls das Konzept der Trockenstresskennzahlen an, wählen in ihrer Untersuchung jedoch fixe Referenz- und Erholungszeiträume von drei Jahren. Eine weitere vor allem in älteren Untersuchungen bereits angewandte Methode wäre, als Referenz den mittleren Radialzuwachs über einen bestimmten Zeitraum festzulegen. So nimmt KRÖNER (1952) für seine Untersuchung zum Einfluss des Trockenjahres 1947 auf das Dickenwachstum als Referenzzeitraum die Jahre 1941 bis 1950. Problematisch ist, wenn die Werte des Trockenjahres selbst in der Referenzperiode enthalten sind und damit der tatsächliche Zuwachseinbruch unterschätzt wird. Längere Referenzperioden können, wenn das Trockenereignis in der Mitte der Periode liegen soll, nur dann gewählt werden, wenn das Trockenjahr bereits entsprechend lange zurückliegt. Liegt das Trockenjahr nicht in der Mitte der ausgewählten Referenzperiode, sondern an deren Ende so sind Alterseffekte nicht auszuschließen und der Zuwachseinbruch würde überschätzt. Neben diesen Schwierigkeiten, tritt das Problem der tatsächlichen Erholungsdauer (siehe voriger Abschnitt in diesem Kapitel) bei diesem Ansatz genauso auf. Diese kann auch hier aufgrund von eventuell während der Erholungsphase auftretenden neuen Stressereignissen letztlich nicht genau eingegrenzt werden. Wenn im Berechnungsmodell nur die Dauer bis zum Erreichen dieses Ausgangsniveaus analysiert wird, und dieser Zeitpunkt auch unterjährig erreicht werden kann, entsteht eine Verzerrung durch das im ersten Jahr nach

Überschreiten des Ausgangsniveaus erreichte Zuwachsniveau. Dieses Niveau wiederum kann durch ganz andere wachstumsentscheidende Parameter geprägt sein, die letztlich mit der Erholungsreaktion des individuellen Baumes nicht mehr im Zusammenhang stehen.

Alle vier genannten Methoden, d.h. fixe Referenzzeiträume die das Trockenjahr beinhalten, fixe Zeiträume vor und nach dem Trockenjahr, Analyse nur des Erholungszeitraums oder die gewählte Vorgehensweise mit pro Trockenjahr neu definierten, variablen Referenz- und Erholungszeiträumen haben ihre Schwächen. Der Ansatz mit den variablen Zeiträumen und den Trockenstresskennzahlen wurde letztlich ausgewählt, da er – auch in Kombination mit den relativen Matrixpotenzialwerten – an die Situation des jeweiligen Trockenjahres adaptierbar ist und anhand der Dreiecksdiagramme gut visualisiert und interpretiert werden kann. Mit diesem Ansatz können Unterschiede in der Wasserverfügbarkeitssituation in den Trockenjahren aber auch in den Erholungszeiträumen berücksichtigt, und so die unterschiedliche Trockenstressreaktion der Bäume deutlicher herausgearbeitet werden.

Mit dem Konzept der Trockenstresskennzahlen konnte gezeigt werden, dass die Vitalität der älteren Buchen nach dem Trockenjahr 2003 stärker gelitten hat, als die der Eichen (vgl. Abbildung 49 und 50). Allerdings endet im Konzept der Trockenstresskennzahlen die Analyse mit dem Ende des definierten Erholungszeitraumes. Im Sinne z.B. des Stresskonzepts von BECK UND LÜTTGE (1990) würden Buchen und Eichen bei Trockenstress irgendwann eine Toleranzschwelle erreichen. Trockenstress der eine elastische Reaktion, also eine Rückkehr zum Ausgangsniveau und darüber hinaus, auslöst wird als Eustress bezeichnet. Überschreitet die Trockenstress-Intensität die Toleranzschwelle bewegt sich der Pflanzenorganismus in Richtung Mortalität, Distress ist die Folge. Anhand der Trockenstresskennzahlen ist es nur sehr eingeschränkt möglich einzuschätzen, wie weit sich die untersuchten Buchen und Eichen in den Trockenjahren 1976 oder 2003 von der Toleranzschwelle entfernt waren. Betrachtet man lediglich die Trockenstresskennzahlen anhand der Radialzuwächse auf 1.3 m Höhe kann man zumindest bei der Eiche bereits wieder eine leichte Erholung erkennen, aber auch für die Buche scheint das Minimum erreicht. Vergleicht man aber die Trockenstresskennzahlen anhand der Radialzuwächse in unterschiedlichen Höhen wird deutlich, dass bei den Buchen-Altbeständen die Toleranzschwelle möglicherweise bereits überschritten wurde. Wie lange können von Jahr zu Jahr sinkende Jahrringbreiten in welchen Baumhöhen von Buchen und Eichen realisiert werden, bevor eine endgültige Umkehr des Trends nicht mehr möglich ist? Diese Analyse ist im Konzept der Trockenstresskennzahlen kaum möglich, vor allem weil die Variabilität der Zuwachsreaktion im Erholungszeitraum nur durch einen Mittelwert abgebildet wird.

5.3 Diskussion der Ergebnisse

5.3.1 Diskussion der Ergebnisse zum Höhenzuwachs und Höhenwachstum

Die Höhenwachstumsgänge der fünf ausgewählten (vor-)herrschenden Bäume pro Baumart und Standort zeigen insgesamt eine große Variabilität. Damit stellt sich die grundsätzliche Frage, ob aufgrund der irregulären Schwankungen im jährlichen Höhenzuwachs überhaupt Rückschlüsse auf Witterungs- oder Trockenstress-Effekte möglich sind. Abhängigkeiten des Höhenzuwachses von den Witterungs- und Wachstumsverhältnissen des Vor- oder gar Vorvorjahres (sogenannte Lag-Effekte) erschweren die Interpretation der Daten zusätzlich.

Die Analyse der jährlichen Höhenzuwächse hat folgende Ergebnisse erbracht: Die jährlichen Höhenzuwachsschwankungen bei beiden Baumarten sind auf den besser wasserversorgten Standorten (beide Standorte im Schwarzwald, sowie Nordhang am Stromberg: Leonbronn) höher, als auf dem trockenen Standort (Spielberg). An diesem Standort zeigen Buchen und Traubeneichen überraschenderweise die größte Ähnlichkeit im Wachstumsverlauf. Während die Buche im Trockenjahr, zumindest auf den gut wasserversorgten Standorten im Schwarzwald,

einen überdurchschnittlichen Höhenzuwachs zeigt (Abbildung 35a und b, oben), ist dies bei den Traubeneichen nicht festzustellen.

Zum jährlichen Verlauf des Triebblängenwachstums existieren, aufgrund der messtechnischen Schwierigkeiten in größerer Höhe, kaum Untersuchungen, die über das Alter von ca. 15 Jahren bei den untersuchten Individuen hinausgehen. Für Buche und Eiche bieten die Untersuchungen von BURGER (1926) und SPÄTH (1912) an Jungpflanzen bei Zürich und Berlin die detailliertesten Anhaltspunkte. Der erste Triebblängen-Wachstumsschub findet bei jungen Buchen demnach von Anfang Mai bis längstens Mitte Juni statt. Der zweite Wachstumsschub (Johannistrieb) erfolgt von Ende Juni bis Mitte Juli. Junge Eichen zeigten an denselben Standorten einen ersten Wachstumsschub zwischen der zweiten und der vierten Maiwoche, sowie einen zweiten Schub in den ersten beiden Juliwochen (SPÄTH) oder in den letzten beiden Juliwochen (BURGER). Allerdings ist eine Übertragung des jährlichen Höhenwachstumsverhaltens von Jungpflanzen auf ältere Bäume kaum möglich (WAREING 1956). Mehrere Autoren gehen von einer kürzeren jährlichen Periode des Triebblängenwachstums bei älteren Bäumen im Vergleich zu den Jungpflanzen aus (BORCHERT 1976; KOZLOWSKI ET AL. 1991; WAREING 1956) für *Robinia pseudoacacia* sowie (FORWARD, NOLAN 1964) für *Pinus resinosa*. REICH (1980) stellt dagegen in seiner Untersuchung an Amerikanischer Weißeiche (*Quercus alba*) eine kürzere jährliche Triebblängen-Wachstumsperiode bei Jungpflanzen im Vergleich zu etwas älteren Bäumen fest. Unumstritten scheint in der wissenschaftlichen Literatur jedoch die Abhängigkeit des Triebblängenwachstums vieler Baumarten von den im Vorjahr eingelagerten Reservestoffen zu sein. So weisen z.B. ZAHNER und STAGE schon (1966) den Einfluss von Wassermangel im Vorjahr auf das Höhenwachstum von *Pinus resinosa* sowie MAKONEN-SPIECKER UND EVERS (1993) auf das von Fichten nach und KOZLOWSKI (1991) misst der Temperatur des Vorjahres für das Höhenwachstum vieler Baumarten der gemäßigten Klimazone eine generelle Bedeutung bei. Speziell für das Wipfelwachstum von Altbuchen bei Göttingen zeigt GRUBER (2001) den positiven Einfluss der Niederschläge in der Vegetationszeit des Vor- und Vorvorjahres auf. Die letztgenannten Zusammenhänge verdeutlichen, warum erst im Trockenfolgejahr eine Reaktion im Höhenzuwachs erwartet werden kann. Beim vorgestellten Datenmaterial zeigt sich diese Reaktion jedoch ausschließlich bei den Buchen, nicht jedoch bei den untersuchten Traubeneichen. Der beobachtete überdurchschnittliche Höhenzuwachs der Buchen in den Trockenjahren lässt vermuten, dass die über den Winter gut gefüllten Bodenwasservorräte ein ungehindertes Höhenwachstum erlauben und eventuell die überdurchschnittlichen Temperaturen im Frühjahr der Trockenjahre das Triebblängenwachstum begünstigen. Die Auswertung der DWD-Grid-Daten zeigt, dass über alle vier Standorte hinweg die Temperaturen in den Monaten Mai bis Juli im Jahr 1976 1.9° Celsius und im Jahr 2003 sogar 3.0° Celsius über dem langjährigen Mittel (1901-2010) lagen.

Die Erholungsreaktion der Buchen im Schwarzwald setzt im zweiten, spätestens im dritten Jahr nach dem Trockenjahr ein, wobei die Überlagerung der Erholungsreaktion von den zeitgleichen Witterungseinflüssen während der Triebstreckungsphase nicht untersucht wurde. Die jährlichen Schwankungen im Höhenzuwachs der Traubeneichen lassen dagegen kaum Rückschlüsse auf witterungsbedingte Stress- oder Erholungsreaktionen zu.

Der Verlauf der mittleren und auch der einzelbaumweisen Wachstumskurven lässt keinen Einbruch nach den Trockenjahren 1976 oder 2003 erkennen. Zur Darstellung periodischer Zuwachsveränderungen wurde ein „normaler“, baumindividueller Höhenwachstumsgang modelliert. Dieser normale Höhenwachstumsgang entspricht dem gestreckten mittleren Höhenwachstumsverlauf. Mit der anschließenden Quotientenbildung lassen sich Abweichungen des tatsächlichen Höhenwachstums von der geglätteten Kurve darstellen. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass baumindividuelle Höhenwachstumsverläufe berücksichtigt, und nicht bereits durch eine Mittelwertbildung, z.B. indem eine

Höhenwachstumskurve für das Kollektiv der fünf Bäume pro Baumart und Standort erstellt wird, verwischt werden. Allerdings zeigen auch die Quotienten der Einzelbäume (Daten nicht gezeigt) eine erhebliche Bandbreite.

Die Hypothese, dass das Höhenwachstum der Buchen unter den Trockenepisoden in den Jahren 1976 und 2003 stärker gelitten hat, als dasjenige der Traubeneichen (H1) kann für die untersuchten Mischbestände nicht bestätigt werden – im Gegenteil, in zwei Fällen (Heuweiler und Spielberg nach 1976) scheint die Traubeneiche sogar mehr unter den Folgen des Trockenjahres gelitten zu haben als die Buche.

Auch die Hypothese, dass Trockenjahre bei beiden Baumarten zu einer nachhaltigen Veränderung des „normalen“ Höhenwachstums führen (H2), kann anhand des untersuchten Materials nicht bestätigt werden. Die Höhenwachstumsverläufe der Untersuchungsbäume (Anhang 11) zeigen weder nach dem Trockenjahr 1976 noch nach 2003 eine deutliche Veränderung. Lediglich am Standort Spielberg ist anhand der Quotientenbildung (Abbildung 38) eine Abweichung vom „normalen“ Höhenwachstumsverlauf erkennbar. Dabei sind nach 1976 signifikant negative Abweichungen erst 1981 (nur Eiche) vorhanden und nach 2003 erst 2008 (Buche und Eiche). Aufgrund des unterschiedlichen Wachstumsverlaufs der Einzelbäume und der anschließenden raschen Annäherung der realen Wachstums- an die modellierten Wachstumskurven kann aus diesem Einzelbeispiel jedoch keine nachhaltige Veränderung des „normalen“ Höhenwachstums abgeleitet werden.

Aus dem Vorgesagten ergibt sich, dass auch die Hypothese, dass die Eichen im Höhenwachstum zukünftig erst zu einem späteren Zeitpunkt von den Buchen überholt werden (H3), zu verwerfen ist.

5.3.2 Diskussion der Ergebnisse zum Radialzuwachs

5.3.2.1 Diskussion der Ergebnisse aus dem direkten Vergleich der Radialzuwachswerte

Die mittleren Radialzuwachsserien von Buchen und Eichen wurden zunächst für alle Untersuchungsbäume und anschließend getrennt für die beiden Alterskollektive, für die Untersuchungsregionen und für die Expositionen gegenübergestellt.

In der Gegenüberstellung der Alterskollektive (Abbildung 40) fällt auf, dass bei den Altbeständen ab ca. 1990 der Radialzuwachs der Buchen auf dem Niveau der Eichen verläuft. Im Vergleich zu den Angaben bei BONN (1998) ist bemerkenswert, dass dieser bei seinen untersuchten Mischbeständen sowohl auf einem besser (Gleichberge 1, ebenda, S. 97, Abb. 42) als auch auf einem schlechter wasserversorgten Standort (Kyffhäuser 3, ebenda, S. 98, Abb. 43) beobachtet, dass die Buche im fortgeschrittenen Bestandesalter die Eiche überholt. Allerdings beträgt das mittlere Alter der Untersuchungsbäume in 1.3 m Höhe im Entnahmejahr des Bohrkerns 1995, für die beiden bei BONN genannten Beständen ca. 160 Jahre, wobei die Buche im ersten Bestand ca. 30 und im zweiten ca. 10 Jahre jünger ist als die Eiche. Das mittlere Alter der hier untersuchten Altbestände lag bezogen auf die entnommenen BHD-Scheiben dagegen bei ca. 120 Jahren und schwankte zwischen 80 und 160 Jahren, jedoch ohne nennenswerte Altersunterschiede zwischen den beiden Baumarten am jeweiligen Standort. Neben den abweichenden Altern der untersuchten Bäume als Begründung für die Differenz zur Arbeit von BONN, können Effekte, die durch das unterschiedliche Beprobungsschema bedingt sind, hier ebenfalls eine Rolle spielen. Während in der vorgelegten Untersuchung nur vorherrschende Bäume eingeschlagen wurden, beprobte BONN in zusammenhängenden Bestandesbereichen alle Bäume, d.h. auch Bäume der Kraft'schen Klassen 3 und 4. Gerade die mitherrschenden und beherrschten Buchen können aufgrund ihrer Konkurrenzvorteile als Schattbaumart in der

Untersuchung von BONN zu einer Verschiebung zugunsten der Buche geführt haben (vgl. hierzu auch die Diskussion zur Auswahl der Untersuchungsbäume, Kapitel 5.1.1).

Die Radialzuwächse von Buchen und Eichen haben sich in den Untersuchungsbeständen am Stromberg (Abbildung 41b) von 1979 nach 1980 ausnahmsweise in unterschiedliche Richtungen entwickelt. In den Untersuchungsbeständen im Schwarzwald verlief der Radialzuwachs der beiden Baumarten von 1979 nach 1980 jedoch gleichgerichtet. Aus diesem Grund wurde die Witterungen in den genannten Jahren in beiden Regionen mit den langjährigen Mittelwerten verglichen (Abbildung 55). Es wird deutlich, dass 1980 die Niederschläge in den Monaten Juni und Juli in beiden Regionen überdurchschnittlich waren, im Schwarzwald mehr als am Stromberg. Anders sieht die Situation 1979 aus. In beiden Regionen sind die Niederschläge von Mai bis Juni unterdurchschnittlich, am Stromberg relativ zur Klimanormale etwas ausgeprägter als im Schwarzwald. Im August 1979 kann im Schwarzwald das Niederschlagsdefizit durch einen überproportional guten Monat wohl teilweise kompensiert werden. An den vier Untersuchungsstandorten im Stromberg fallen im August 1979 jedoch immer noch etwas unterdurchschnittliche Niederschlagsmengen.

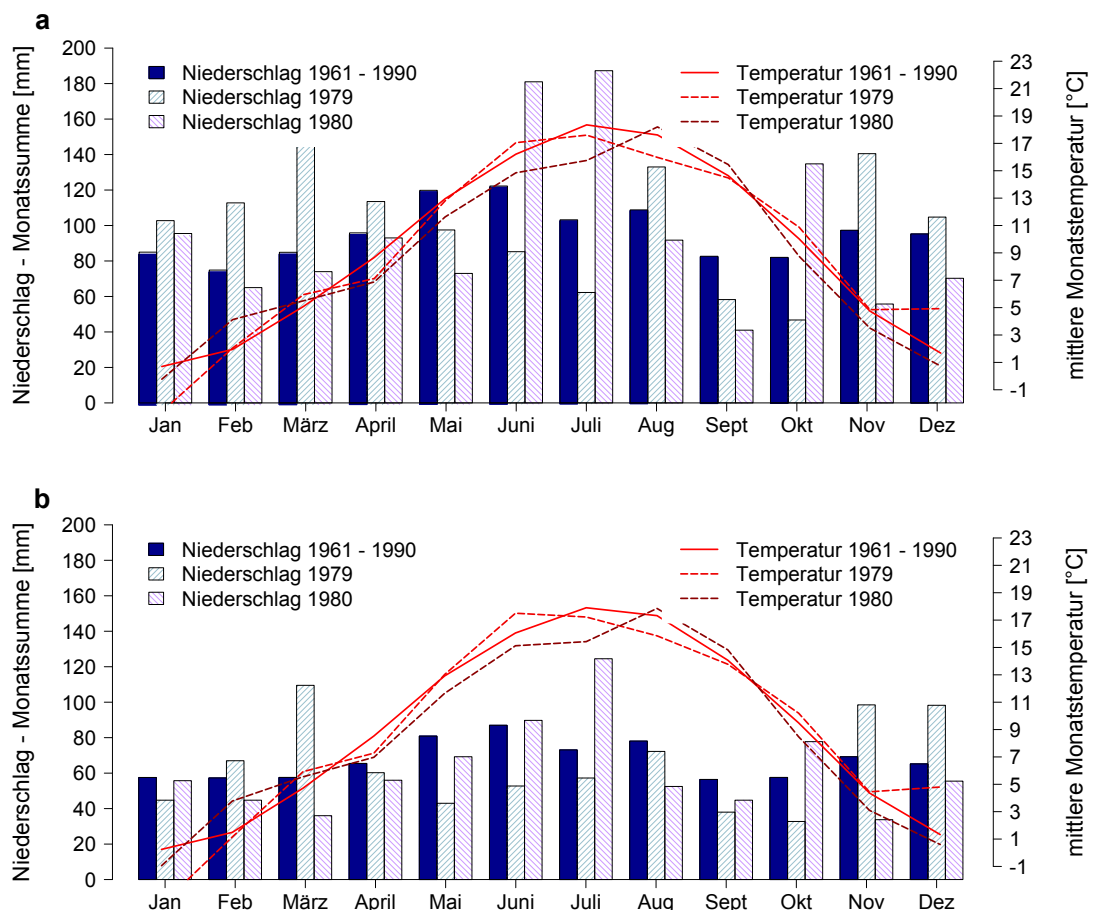


Abbildung 55: Monatliche Niederschlagssumme und mittlere Monatstemperatur in den beiden Untersuchungsregionen: Klimanormale und die Jahre 1979 und 1980

Die Mittelwerte der vier Untersuchungsstandorte am Westabfall des Schwarzwaldes sind oben (a) und für die vier Untersuchungsstandorte im Stromberg unten (b) dargestellt; Quelle: DWD-Grid-Daten 1979 liegen die Niederschläge von Mai bis Juli in beiden Regionen unter dem langjährigen Mittel, 1980 dagegen im Juni und Juli darüber. Nur im Schwarzwald fallen im August 1979 überdurchschnittliche Niederschlagsmengen.

Ein Vergleich des Verlaufs der Matrixpotenzialwerte in den Jahren 1979 und 2003 zeigt, dass im Stromberg (Abbildung 56, e bis h) das Matrixpotenzial an allen Standorten Ende Juli 1979 sogar deutlich unter die Werte von 2003 gefallen sind, wohingegen an den Untersuchungsstandorten

im Schwarzwald (Abbildung 56, a bis d) dies nur am Standort Attental und marginal auch am Standort Sulzburg der Fall ist. Vor allem aber hatten die Niederschläge im August 1979 im Schwarzwald ein deutliches Ansteigen der Matrixpotenzialwerte zur Folge. Diese Erholung bleibt an den Standorten im Stromberg aus. Im Verlauf des Herbstes führen die geringen Niederschläge im September und Oktober zu sehr niedrigen Matrixpotenzialwerten bis Ende Oktober in beiden Regionen, wobei auch diese Entwicklung im Stromberg ausgeprägter ist. Damit hatten die Eichen im Stromberg offensichtlich nicht mehr die Möglichkeit genügend Reservestoffe zu produzieren und einzulagern, um im darauffolgenden Jahr 1980 einen breiten Jahrring auszubilden. Für die Buchen im Stromberg hat dieses Niederschlagsdefizit im Spätsommer/Herbst des Vorjahres nicht zu einem Zuwachseinbruch im Folgejahr geführt. Der Hauptteil des Jahrringes 1979 ist bis Ende Juli bereits gebildet, so dass sich der trockene Spätsommer/Herbst nicht mehr gravierend auf den Radialzuwachs des laufenden Jahres auswirken kann. Allerdings verzeichnen beide Baumarten in beiden Untersuchungsregionen 1979 einen Zuwachsrückgang, im Vergleich zu 1978. Für die Buche ist der Wasserhaushalt im Spätsommer des Vorjahres jedoch im Vergleich zur Eiche weniger entscheidend. Diese Interpretation wird durch ein zweites Jahrringsignal mit ähnlichem Verlauf im Jahr 1965/1966 gestützt. In beiden Regionen zeigt der bis 1964 und ab 1966 gleichgerichtete Verlauf von Buchen und Eichen in den Jahren 1965 auf 1966 eine gegenläufige Steigungen (vgl. Abbildung 41). Während die mittleren Jahrringserien der Buchen von 1965 nach 1966 ansteigen, fallen die der Eichen ab. Auch hier zeigt die Analyse der Niederschlagswerte, dass in beiden Regionen im Jahr 1965 die Niederschläge vor allem im Oktober deutlich unter den langjährigen Mittelwerten lagen, konkret im Schwarzwald bei ca. 30% und im Stromberg bei 11% des langjährigen Mittels (1961-1990).

Diese Witterungsanalyse der beiden singulären Ereignisse zeigt die möglicherweise große Bedeutung von Trockenheit am Ende der Vegetationsperiode für den Radialzuwachs der Eichen im Folgejahr hin. Für ein Auseinanderlaufen der Radialzuwachskurven der beiden Baumarten können immer auch nur eine Baumart betreffende biotische Schädigungen oder unterschiedliche Zyklen von Mastjahren beiden Baumarten verantwortlich sein. Letzteres ist aufgrund des Alters der Jungbestände wenig wahrscheinlich, Ersteres aber speziell für die Eiche aufgrund deren Prädisposition für verschiedene Blatt fressenden Raupenarten durchaus möglich.

Die im Vergleich zur Buche vermutete stärkere Abhängigkeit der Eiche von den Vorjahresverhältnissen wird durch die Untersuchung von BARBAROUX ET al. (2003) unterstützt. Sie zeigen im direkten Vergleich von Traubeneiche und Buche, dass Erstere von Oktober bis Juni im Vergleich zu Buche doppelt so viele eingelagerte Kohlenstoffe (TNC = total non structural carbohydrate) verbrauchte. Dieses würde auf die größere Bedeutung der Reservestoffe bei der Eiche hinweisen, kann jedoch auch mit den unterschiedlichen Ressourcenverbrauch der beiden Baumarten speziell im untersuchten Winter (1999/2000) zu tun haben.

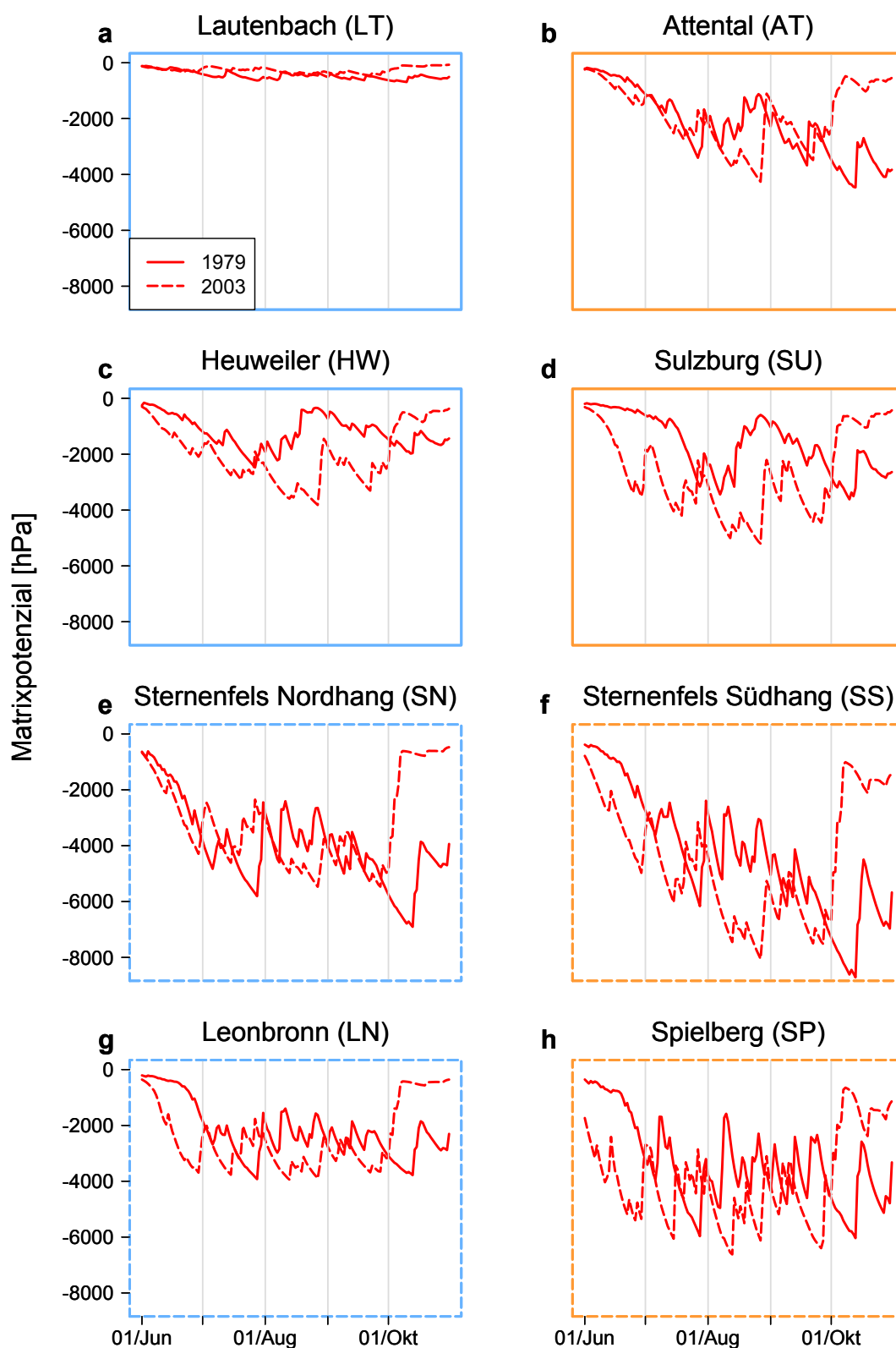


Abbildung 56: Verlauf der Saugspannungswerten von Juni bis Oktober: 1979 und 2003 im Vergleich
 Untersuchungsstandorte am Westabfall des Schwarzwaldes sind oben (a bis d) und die Untersuchungsstandorte im Stromberg unten (e bis h) dargestellt; Quelle: Simulation mit LWF-BROOK-90
 Während die Saugspannung an den Standorten im Stromberg im Oktober 1979 auf sehr tiefe Werte absinkt, wird dies durch die Niederschläge im August an den Standorten im Schwarzwald verhindert.

5.3.2.2 Diskussion der Ergebnisse aus dem Vergleich der Radialzuwachswerte in unterschiedlichen Stammhöhen

In Abbildung 43 stellt jede Kurve den Mittelwert von vier Standorten dar. Da die Altbestände eine große Streuung des mittleren Alters aufweisen, können in den Mittelwertkurven Effekte, die durch das unterschiedliche Alter der Bäume im entsprechenden Kalenderjahr bedingt sind, enthalten sein. Für die Untersuchungsbäume der Jungbestände, die jeweils ein fast identisches Alter aufweisen, trifft diese Aussage jedoch nicht zu.

Die geringen Radialzuwächse der höheren Stammscheiben bei den Altbeständen zum Ende des Betrachtungszeitraumes, lassen sich für die obersten Scheiben durch den höheren Verzweigungsgrad des Stammes und den damit deutlich geringeren Durchmesser dieser Scheiben erklären. Für die Scheiben, die in 5 und 10 m Höhe entnommen wurden, trifft das Argument des höheren Verzweigungsgrades nicht zu, der Kronenansatz der Altbestände lag im Schnitt bei 12.5 m. Für die weitere Interpretation der Radialzuwächse in den höheren Stammabschnitten wird auf Kapitel 5.3.2.4 verwiesen.

5.3.2.3 Diskussion der Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse

Die Trendbereinigung mit dem 20jährigen Spline bewirkt, dass die Unterschiede zwischen den Indexserien von Buchen und Eichen deutlicher hervortreten. Auch mit dieser Trendbereinigung zeigen die Serien beider Alterskollektive, v.a. aber die der Jungbestände ein starkes gemeinsames Signal. In diesem Kollektiv sind die Unterschiede zwischen den Expositionen größer als zwischen den beiden Baumarten (vgl. Tabelle 6). Bei den älteren Untersuchungsbäumen sind die Unterschiede zwischen Buchen und Eichen auch bei den kaum durch die Trendfunktion beeinflussten Radialzuwachserserien bereits erkennbar, allerdings wird dieser Unterschied noch von einer nicht dem Schema des Untersuchungsdesign folgenden Aufteilung der Standorts-Baumarten-Kombination (2. Hauptkomponente) überlagert.

Insgesamt sind die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse der Altbestände mit denen von FRIEDRICHS ET AL. (2009) kongruent. Auch sie findet bei ihrer Untersuchung zu Buche, Traubeneiche und Kiefer zunächst ein starkes gemeinsames Signal. Die erste Hauptkomponente erklärt bei FRIEDRICHS ET AL. 29.7 % der gemeinsamen Varianz, auf der Datengrundlage von 228 Indexserien die mit einem 32jährigen Spline trendbereinigt wurden (Betrachtungszeitraum: 1901–2002). Im Vergleich dazu wird bei der vorliegenden Untersuchung durch die erste Hauptkomponente 46.9 % der gemeinsamen Varianz erklärt, wobei hierbei nur von acht analysierten mittleren Indexserien und einer als Vergleich herangezogenen Trendbereinigung mit einem 30jährigem Spline ausgegangen wurde (Betrachtungszeitraum: 1930 – 2010, vgl. Tabelle 6: Altbestände). Die zweite Hauptkomponente erklärt bei FRIEDRICHS ET AL. 10.1 % der Varianz und trennt v.a. zwischen den Untersuchungsregionen (Kellerwald und Eifel). Für die hier analysierten Radialzuwachsindices erklärt die zweite Hauptkomponente 17.3 % der Varianz und trennt etwas stärker zwischen den Baumarten als zwischen den Regionen. Die dritte Hauptkomponente erklärt bei FRIEDRICHS ET AL. 8.2 % der Varianz und trennt v.a. zwischen den Baumarten, wobei hauptsächlich die Eiche von Buche und Kiefer separiert wird (ebenda, S. 734, Fig. 5). In der vorliegenden Untersuchung erklärt die dritte Hauptkomponente 11.2 % der Varianz und trennt etwas stärker zwischen den Regionen (Schwarzwald versus Stromberg) als zwischen den Baumarten. Aufgrund der Unterschiede in den Berechnungsmethoden, den Betrachtungszeiträumen, im Untersuchungsumfang und bei der Auswahl der Standorte sind die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalysen beider Untersuchungen nicht direkt vergleichbar. Dennoch wird deutlich, dass auch in anderen Regionen Deutschlands die Radialzuwächse von Buchen und Eichen große gemeinsame Varianzanteile aufweisen und erst standörtliche Unterschiede die Differenzen zwischen den Baumarten deutlicher hervortreten lassen.

5.3.2.4 Diskussion der Ergebnisse der Trockenstresskennzahlen

Trockenstressreaktion 1976 und 2003 und Konkurrenzsituation: Vergleich zu einer bayrischen Untersuchung

Der generell stärkere Radialzuwachs einbruch der Buchen in den Trockenjahren im Vergleich zu den Eichen (vgl. Abbildung 48) überrascht – auch aufgrund der Unterschiede in der Holzanatomie – nicht. Die geringere Resistenz der Buchen wurde bereits in anderen Untersuchungen z. B. von KÖRNER (1952) oder ZANG ET AL. (2011) erkannt (vgl. Kapitel 2.5.2). Die in der vorliegenden Untersuchung beobachtete schnellere Erholungsreaktion der Buchen wurde von den beiden genannten Autoren jedoch nicht beobachtet, bzw. nicht direkt thematisiert. KÖRNER stellt nach dem Trockenjahr 1947 einen geringeren Grundflächenzuwachs der Buchen in den Jahren 1948 und 1949 im Vergleich zu dem der Eichen fest. ZANG stellt beim langfristigen Zuwachs einbruch (Radialzuwachs im Trockenjahr bis zwei Jahre danach im Verhältnis zum Radialzuwachs fünf Jahre vor dem Trockenjahr) kaum Unterschiede zwischen den beiden Baumarten fest. Aufgrund anderer methodischer Ansätze und anderer Referenz- bzw. Erholungszeiträume sind diese Untersuchungen allerdings nur eingeschränkt mit den hier vorgestellten Ergebnissen vergleichbar.

PRETZSCH ET AL. (2013) arbeiten dagegen ebenfalls mit dem Konzept der Trockenstresskennzahlen. Sie interessieren sich für Unterschiede zwischen Buchen- und Eichen-in Rein- und Mischbeständen nach den Trockenjahren 1976 und 2003. Anders als in der vorliegenden Arbeit, werden bei PRETZSCH ET AL. die Trockenstresskennzahlen jedoch anhand der Grundflächenzuwächse bei einheitlichen Referenz- und Erholungszeiträumen von drei Jahren berechnet. Um beide Untersuchungen dennoch miteinander vergleichen zu können, wurde das Kollektiv der 80 Untersuchungsbäume analog zu den bei PRETZSCH ET AL. (2013, 487) genannten Kriterien aufgeteilt. Dabei erfolgt die Trennung zwischen Rein- und Mischbeständen anhand der Baumarten der sechs nächsten Konkurrenten. Bei drei oder mehr Konkurrenten, die von einer anderen Baumart waren als der Untersuchungsbaum, wurde von einem Mischbestand ausgegangen. Untersuchungsbäume mit fünf oder sechs Konkurrenten die von derselben Art waren, wurden dem Reinbestand zugeordnet. Die Definition der Reinbestände unterscheidet sich damit geringfügig von der bei PRETZSCH ET AL.. Dort wurden als dem Reinbestand zugeordnete Bäume nur solche angesprochen, die ausschließlich von sechs gleichartigen Konkurrenten umgeben waren. Diese unterschiedliche Aufteilung war notwendig, da sonst in der vorliegenden Untersuchung kaum Bäume vorhanden gewesen wären die dem Reinbestand hätten zugeordnet werden können.

Tabelle 7: Trockenstresskennzahlen für Buchen und Eichen im Vergleich zwischen PRETZSCH ET AL. (2013) und der hier vorgelegten Untersuchung

Buche	Rt_{Bu1976}	Rc_{Bu1976}	Rs_{Bu1976}	Rt_{Bu2003}	Rc_{Bu2003}	Rs_{Bu2003}
PRETZSCH ET AL. (2013, Table S1 (B))-Reinbestand	0.65	2.13	1.08	0.85	0.99	0.80
PRETZSCH ET AL. (2013, Table S3 (B))-Mischbestand mit Eiche	0.85	2.00	1.36	1.03	1.44	1.50
MATTES (2014, vgl. Abbildung 48)	0.63	1.89	1.13	0.74	1.21	0.86
Eiche	Rt_{Ei1976}	Rc_{Ei1976}	Rs_{Ei1976}	Rt_{Ei2003}	Rc_{Ei2003}	Rs_{Ei2003}
PRETZSCH ET AL. (2013, Fig. 6 und Table S1 (B))-Reinbestand	0.86	0.53	0.97	0.96	1.05	0.96
MATTES (2014, vgl. Abbildung 48)	0.81	1.46	1.14	0.80	1.11	0.87

Ein detaillierter Vergleich der Trockenstresskennzahlen zwischen PRETZSCH ET AL. und der hier vorgelegten Untersuchung ermöglicht Tabelle 7 und Abbildung 57. In der Untersuchung von PRETZSCH ET AL. sind nur für die analysierten Buchen unterschiedliche Trockenstresskennzahlen

für Rein- und Buchen-Eichen-Mischbestände angegeben, die Zahlen für Eichen-Rein- und Eichen-Mischbestände entsprechen sich dagegen (ebenda, Fig. 6C, Seite 490).

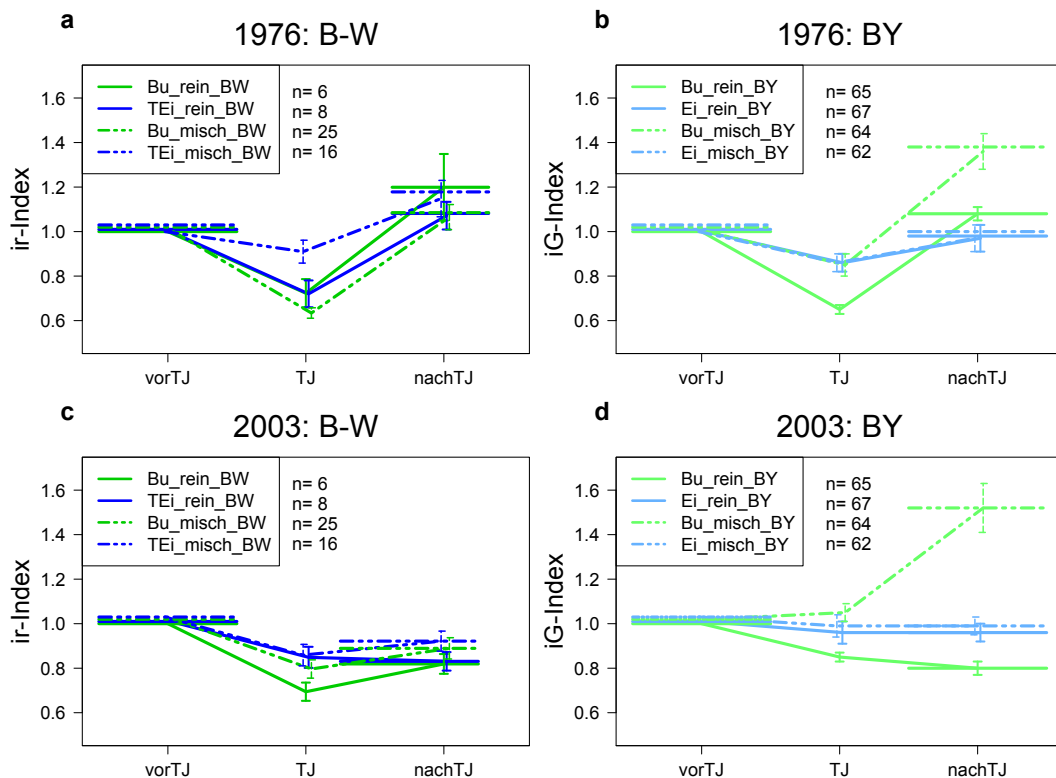


Abbildung 57: Vergleich der Trockenstresskennzahlen in „Rein- und Mischbeständen“

Dargestellt sind die Trockenstresskennzahlen in den Trockenjahren 1976 (oben, a und b) und 2003 (unten, c und d) für Standorte in Baden-Württemberg (links, a und c) in Bayern (rechts, b und d). Datenquelle für die Standorte in Baden-Württemberg (B-W) ist die hier vorgestellte Untersuchung. Datenquelle für die Standorte in Bayern (BY) ist die Untersuchung von PRETZSCH ET AL. (2013). Die Werte wurden der Tabelle S1 und S3 im Zusatzmaterial entnommen. Reinbestände sind mit durchgezogener Linie, Mischbestände mit gestrichelt-punktiertes Linie dargestellt. Der Standardfehler für die Reinbestände ist mit durchgezogener und etwas dickerer Linie gekennzeichnet, der für die Mischbestände mit dünnerer und gestrichelter Linie. Damit übereinanderliegende Linien sichtbar werden, wurden diese versetzt dargestellt.

In Bayern zeigen die Buchen aus den Mischbeständen im Trockenjahr 2003 keinen Zuwachseinbruch und eine sehr rasche Erholung. Dieses kann in den baden-württembergischen Beständen nicht bestätigt werden.

Im Vergleich der beiden Untersuchungen fallen - trotz der unterschiedlichen Datengrundlage, der sehr viel geringeren Anzahl untersuchter Bäume in Baden-Württemberg und anderer Berechnungsmethoden - die ähnlichen Muster 1976 und 2003 in beiden Bundesländern auf: 1976 verzeichnen beide Baumarten einen deutlichen Einbruch und erholen sich anschließend relativ rasch, 2003 ist dies (bis auf die Buchen im Mischbestand in Bayern) nicht der Fall. Eines der Hauptergebnisse in der Untersuchung von PRETZSCH ET AL. ist, dass die Buche in den Bu-Ei-Mischbeständen von der Beimischung der Eiche profitiert: sie bricht in beiden Trockenjahren weniger stark ein und erholt sich schneller (Abbildung 57 b und d, gestrichelt-punktierte grüne Linie im Vergleich zur durchgezogenen grünen Linie). Dieses Muster ist an den hier untersuchten baden-württembergischen Bäumen 1976 nicht zu finden und 2003 wenig ausgeprägt. 2003 reagieren Buchen und Traubeneichen in den baden-württembergischen Beständen unabhängig von der Mischung sehr ähnlich (Abbildung 57 c), während in Bayern die Buchen in den Mischbeständen eine deutliche Erholung zeigen (gestrichelt-punktierte Linie in Abbildung 57 d). Möglicherweise resultiert dieser Unterschied in der Verschiedenheit der Bodenmatrix der untersuchten Standorte: in Bayern wurde ein breites Standortsspektrum abgedeckt, in Baden-Württemberg wurden gezielt frei drainierbare Standorte ausgewählt.

Für das hier vorgestellte Material aus Baden-Württemberg wurde der Einfluss der benachbarten Baumart auf die Trockenstressreaktionen von Buchen und Eichen mittels einer ANOVA geprüft.

Dazu wurde das Kollektiv der Untersuchungsbäume aufgeteilt: einmal erfolgte die Trennung in zwei Kollektive analog zu der oben genannten Vorgehensweise, einmal erfolgte die Aufteilung in sechs Kollektive abhängig von der tatsächlichen Anzahl der fremden Konkurrenten. Bei beiden gewählten Aufteilungsvarianten konnte kein signifikanter Einfluss der Konkurrenzsituation auf die Trockenstresskennzahlen festgestellt werden (Ergebnisse nicht gezeigt).

Unterschiedliche Reaktion auf Trockenstress in den beiden Alterskollektiven

Das Kollektiv der Altbestände zeigt v.a. 2003 eine deutlich trägere Trockenstressreaktion als das Kollektiv der Jungbestände (vgl. Abbildung 49). D.h. die untersuchten älteren Bäume haben im Vergleich zu den jüngeren Bäumen bei beiden Baumarten deutlich höhere Resistenzwerte und deutlich geringere Recovery-Werte. Im Rahmen von einfachen linearen Regressionen lassen sich diese Zusammenhänge für das Untersuchungsmaterial nachweisen. Abbildung 58 zeigt die Resistenz-Werte aller Untersuchungsbäume für das Trockenjahr 2003 auf 1.3 m Höhe (a) und in 15 m Stammhöhe (b), sowie die Recovery-Werte auf 1.3 m Höhe (c) und in 15 m Stammhöhe (d). Auf 1.3 m Höhe zeigen beide Baumarten eine höhere Widerstandsfähigkeit mit zunehmendem Alter (a), wobei der Zusammenhang bei Buche etwas stärker ausgeprägt ist als bei Eiche. In 15 m Stammhöhe (b) ist die Zunahme mit höherem Alter weniger deutlich ausgeprägt bzw. nur noch bei der Eiche signifikant. Die Fähigkeit zur Erholung nimmt dagegen mit zunehmendem Alter ab, diese Tendenz ist in 1.3 m Stammhöhe (c) nur bei der Buche signifikant, in 15 m Stammhöhe (d) dagegen für beide Baumarten. Die in Abbildung 58 dargestellten Regressionen wurden auch mit dem BHD als Prädiktor und den entsprechenden Trockenstresskennzahlen durchgeführt (nicht gezeigt). Abweichungen von den Zusammenhängen mit dem Alter treten nur im Fall des Zusammenhangs zwischen den Resistenz-Werten der Buchen und dem BHD auf. Dieser ist, anders als der Zusammenhang zwischen den Resistenz-Werten der Buchen und dem Alter, nicht statistisch signifikant. In allen anderen Fällen liegen die p-Werte auf ähnlichem Niveau und die Ausgleichsgeraden zeigen in dieselben Richtungen. KAHLE (2005) hat in seiner Untersuchung festgestellt, dass die Erholungsfähigkeit des Radialzuwachses der Buche bei geringen Stressintensitäten relativ hoch ist, bei höheren Stressintensitäten im Vergleich zu den mit untersuchten Fichten und Tannen jedoch sehr deutlich nachlässt.

Die höhere Trockenstress-Sensitivität herrschender im Vergleich zu beherrschten Bäumen wurde bereits unter Kapitel 5.1.1 diskutiert. MERIAN UND LÉBOURGEOIS (2011) gehen davon aus, dass dieser Unterschied vor allem bei schattentoleranten Baumarten besteht. Da in ihrer Untersuchung die herrschenden und beherrschten Bäume gleich alt waren (ebenda, S. 1382, Table 1), muss davon ausgegangen werden, dass bezüglich der unterschiedlichen Trockenstressreaktion nicht das Alter, sondern die Baumdimension die entscheidende Größe ist. Anhand der vorgestellten Daten kann nicht zwischen einem Alters- und einem Dimensionseffekt unterschieden werden. In dieser Untersuchung wurden nur vorherrschende Bäume ausgewählt, damit haben Bäume mit höheren Durchmessern natürlicherweise ein höheres Alter. Physiologisch kann die trägere Trockenstressreaktion der stärkeren und älteren Bäume durch höhere Kapazitäten für Nährstoffe und Assimilate und insgesamt längere Transportstrecken zwischen den Quellen und Senken erklärt werden.

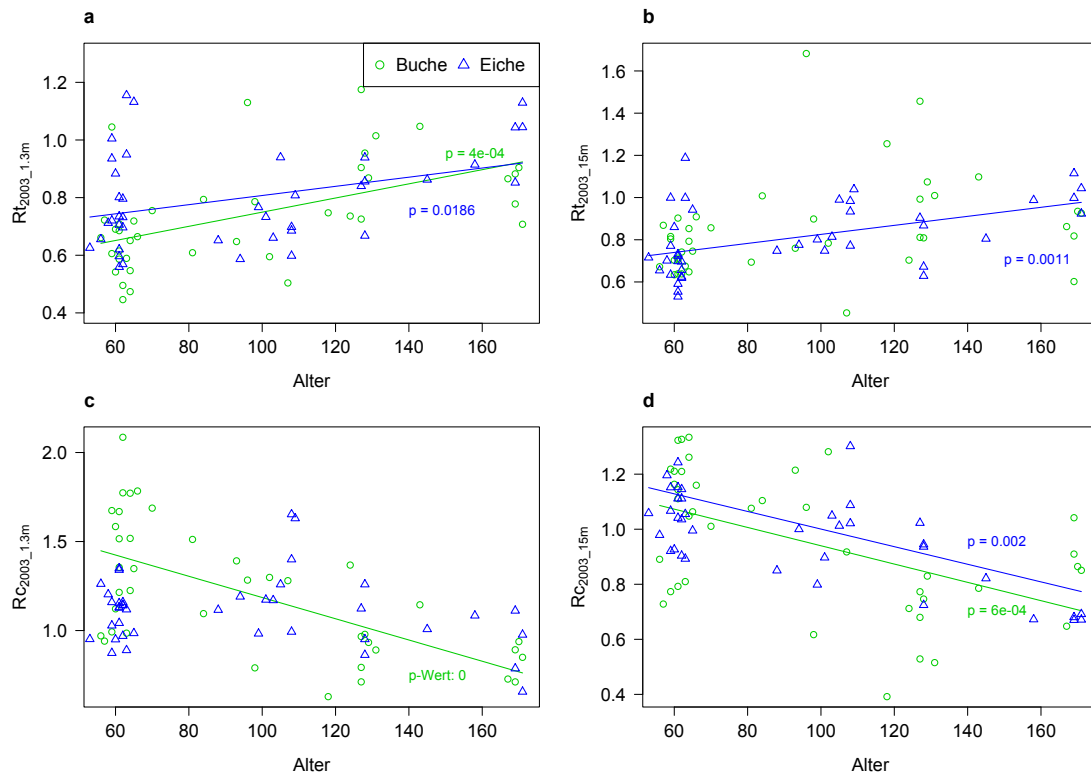


Abbildung 58: Zusammenhänge zwischen dem Alter der Untersuchungsbäume und den Resistenz- bzw. Recovery-Werten im Trockenjahr 2003

Folgende Trockenstresskennzahlen sind über dem Alter der Untersuchungsbäume dargestellt: Resistenz-Werten in 1.3 m Höhe (a, $Rt_{2003_1.3m}$), Resistenz-Werten in 15 m Höhe (b, Rt_{2003_15m}), Recovery-Werten in 1.3 m Höhe (c, $Rc_{2003_1.3m}$) und Recovery-Werten in 15 m Höhe (d, Rc_{2003_15m}). Nur bei signifikanten Zusammenhängen ($p < 0.05$) sind die Regressionsgeraden eingezeichnet.

Mit zunehmendem Alter nimmt die Resistenz von Buchen und Eichen zu, das Erholungsvermögen dagegen ab. Zwischen den beiden Baumarten sind keine signifikanten Unterschiede vorhanden.

Die Hypothese, dass aufgrund der höheren Biomasse und der höheren Speicherkapazitäten die Trockenstressreaktionen im Dickenwachstum von älteren Buchen und Eichen geringer aufgeprägt sind als bei jüngeren (H10), kann aufgrund dieser Analysen bestätigt werden.

Trockenstresskennzahlen in den verschiedenen Stammhöhen

Die Ergebnisse zu den Unterschieden der Trockenstressreaktion in den verschiedenen Stammhöhen kann Folgendermaßen zusammengefasst werden: starker Zuwachseinbruch und rasche Erholung auf BHD-Ebene, aber: geringere Zuwachseinbrüche und langsamere Erholungsreaktion in höheren Stammhöhen. Um dieses Ergebnis zu verifizieren, wurde zunächst geprüft, ob ein stärker abnehmender (Alters-)Trend der Radialzuwachsreihen aus höheren Baumhöhen einen Artefakt bewirkt. Hierzu wurden die mittleren Radialzuwachsreihen aller Stammhöhen von allen Standort-Baumarten-Kombinationen mit einer linearen Regression über den Zeitraum 1970 bis 2010 ausgeglichen (nicht gezeigt). Tatsächlich zeigen die Regressionsgeraden für die Radialzuwachsreihen der höheren Stammscheiben in 15 von 16 Fällen eine geringere Steigung bei den höheren Stammscheiben. Allerdings sind die Unterschiede der Steigungen teilweise marginal, so zeigen z.B. die BHD-Radialzuwachsreihen der Buchen am Standort Lautenbach eine Steigung von -0.017 (mm/Jahr), während die auf 20 m Höhe eine Steigung von -0.019 (mm/Jahr) zeigen. Darüber hinaus ist die Steigung nicht in allen Fällen negativ. Es treten auch Fälle auf, z.B. bei den Eichen am Standort Sternenfels Nordhang oder den Buchen am Standort Leonbronn, bei denen die Regressionsgerade der Radialzuwachsreihe aus 1.3 m Höhe ansteigt, die Regressionsgerade der Radialzuwachsreihe aus

15 oder 20 m Höhe dagegen abfällt. Letztlich konnte aufgrund dieser Analyse nicht ausgeschlossen werden, dass die Abschwächung der Trockenstresskennzahlen in höheren Stammhöhen mit einem Trend der Radialzuwachsreihen zusammenhängt. Deshalb wurde zusätzlich für alle Einzelbäume die Steigung der o.g. Regressionsgeraden berechnet. Die Darstellung aller Trockenstresskennzahlen (Resistenz, Recovery und Resilienz von 1976 und 2003) über den Steigungen der Regressionsgeraden in einem Streudiagramm (nicht gezeigt) verdeutlicht, dass keine Zusammenhänge zwischen den Steigungen und den Trockenstresskennzahlen bestehen. Insgesamt wurden 30 Fälle geprüft, diese ergeben sich aus sechs analysierten Trockenstresskennzahlen in jeweils fünf Stammhöhen. Nur in fünf der 30 Fälle resultiert ein signifikanter Zusammenhang (p-Wert kleiner 0.05). Die Prüfung erfolgte wiederum mit einer linearen Regression, wobei die Steigung der Regressionsgeraden der Radialzuwachsreihen als Prädiktor und die Trockenstresskennzahlen als Antwortvariable genutzt wurden. Bei vier dieser signifikanten Fälle zeigt sich sogar eine größere Steigung der Regressionsgeraden der Radialzuwachsreihen bei größeren Trockenstresskennzahlen. Wenn die Abschwächung der Trockenstressreaktion in höheren Stammhöhen von einem unterschiedlichen Trend der Radialzuwachsreihen in verschiedenen Stammhöhen abhängen würde, wäre mit einer geringeren Steigung der Regressionsgeraden bei größeren Trockenstresskennzahlen zu rechnen gewesen. Damit bleibt festzuhalten, dass es zwar einen unterschiedlichen Trend für die Radialzuwachsreihen in den unterschiedlichen Stammhöhen im Zeitraum 1971 bis 2010 gibt, dieser sich aber nicht auf die Trockenstresskennzahlen auswirkt.

Dass die Buchen in den Altbeständen von der Trockenheit 2003 besonders betroffen waren, zeigen die signifikant geringeren Recovery-Werte der Alt-Buchen im Vergleich zu den Alt-Eichen (Abbildung 49b). Die Trockenstressreaktion in den höheren Stammhöhen (Abbildung 50b) unterstreicht dieses Ergebnis. In allen höheren Stammhöhen (5, 10, 15, 20 m - außer 1.3 m) fallen die Resilienz-Werte unter das Resistenz-Niveau und liegen weit unterhalb des Referenz-Niveaus. Inwiefern diese geringe Widerstandsfähigkeit der Buchen im Kronenbereich auch mit dem hohen Auflichtungsgrad der älteren Untersuchungsbestände zusammenhängt, ist aufgrund des geringen Umfangs des Datenmaterials schwierig zu beurteilen. Der Bestockungsgrad der Altbestände lag zum Zeitpunkt der Aufnahme im Mittel bei 0.7 (vgl. Tabelle 4). Eine Abhängigkeit der Trockenstressreaktion auf 1.3 m Höhe nach 2003 vom Auflichtungsgrad bzw. vom einzelbaumbezogenen Bestockungsgrad ist bei den untersuchten Buchen nicht gegeben (Abbildung 59). Wenn, dann zeigen die Trockenstressreaktionen der Eichen eine signifikante Abhängigkeit von der Bestandesdichte bzw. dem Bestockungsgrad, wobei der signifikant abnehmende Trend bei den Resistenzwerten in 15 m Höhe (Abbildung 59, b) aus waldwachstumskundlicher Sicht plausibel ist, die signifikant zunehmenden Recovery-Werte bei höheren Bestockungsgraden können waldwachstumskundlich jedoch nicht erklärt werden. Mit zunehmender Konkurrenz (höheren Bestockungsgraden) wäre eher mit abnehmenden Erholungswerten zu rechnen, weshalb in diesem Fall von einem Scheinzusammenhang ausgegangen wird.

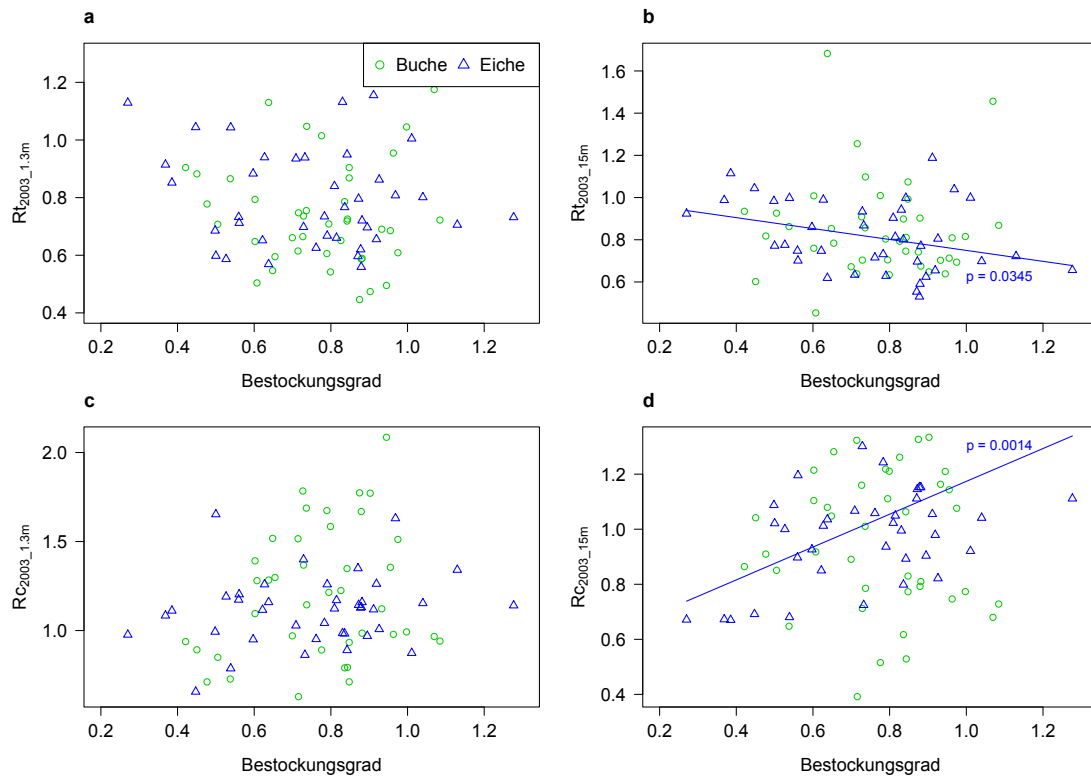


Abbildung 59: Zusammenhänge zwischen Bestockungsgrad am Untersuchungsbaum und ausgewählten Trockenstresskennzahlen für das Trockenjahr 2003

Es ist der Zusammenhang mit den Resistenz-Werten in 1.3 m Höhe (a), mit den Resistenz-Werten in 15 m Höhe (b), mit den Recovery-Werten in 1.3 m Höhe (c) und mit den Recovery-Werten in 15 m Höhe (d) dargestellt. Nur die signifikanten Zusammenhänge ($p < 0.05$) sind mit einer Regressionsgeraden gekennzeichnet.

Der baumindividuelle Bestockungsgrad hat keinen Einfluss auf den Zuwachseinbruch und die Erholungsreaktion der Buchen. Die Eichen zeigen beim Radialzuwachs in 15 m Höhe einen stärkeren Zuwachseinbruch und eine schnellere Erholung bei höheren Bestockungsgraden. Letzteres kann waldwachstumskundlich nicht erklärt werden.

Sowohl die Untersuchungen von BOURIAUD ET AL. (2005) als auch die von VAN DER MAATENTHEUNISSEN ET AL. (2012) werden von den hier vorgelegten Ergebnisse bestätigt: Der stärkste Zuwachseinbruch erfolgt auf BHD-Ebene, ebenso wie die deutlichste Erholung.

Die Ergebnisse von KRÖNER (1952, 43, Tab. 7) zum Zuwachseinbruch bzw. zur Erholungsreaktion nach Trockenjahren entsprechen den hier vorgestellten Ergebnissen nur teilweise. Die Niveauunterschiede der Resistenzreaktion entlang der Stammachse weisen ein ähnliches Muster wie die von KRÖNER untersuchten Buchen auf, d.h. der stärkste Einbruch erfolgte auf 1.3 m Höhe. Die Erholungsreaktion der Buchen ist jedoch deutlich unterschiedlich. Bei KRÖNER war die Erholungsreaktion nach oben hin weniger stark ausgeprägt, bei den Buchen der hier vorgestellten Jungbestände jedoch nach oben hin deutlich positiver. Genau umgekehrt zu den hier vorgestellten Ergebnissen haben die von KRÖNER untersuchten Traubeneichen hinsichtlich des Zuwachseinbruchs reagiert. Während KRÖNER den größten Zuwachseinbruch im Kronenbereich feststellt, haben die untersuchten Jungbestandseichen analog zu den Buchen die deutlichste Resistenzreaktion am Stammfuß (1.3 m Höhe). Die Erholungsreaktion dagegen entspricht wieder dem hier vorgestellten Muster.

Hinsichtlich der Ergebnisse von SCHÖBER (1951a) kann konstatiert werden, dass der Zuwachseinbruch sowohl bei ihm als auch im hier vorgestellten Material im unteren Stammbereich am stärksten ist. Die Erholungsreaktion bei den von SCHÖBER untersuchten Bäumen ist, im Gegensatz zur hier vorgestellten Untersuchung, im unteren Stammbereich wenig ausgeprägt. Weitere Differenzen zum hier vorgestellten Material sind einerseits

möglicherweise durch das unterschiedliche Alter der Bestände zum Zeitpunkt des Trockenstresses begründet. So waren die hier untersuchten Jungbestände zum Zeitpunkt des Trockenjahres 1976 erst ca. 25jährig (vgl. Anhang 14) während SCHOBER knapp 40jährige Bäume untersuchte. Andererseits können die Unterschiede auch durch andere Standorte, andere Bestandesdichten oder auch andere Niederschlagsverhältnisse in der Erholungsphase begründet sein. Bei SCHOBER ist beispielsweise nachzulesen, dass 1949 im Bereich von Göttingen während der Vegetationszeit auch nur 70 % der langjährigen, mittleren Niederschlagsmenge gefallen sind (ebenda, S. 206, Tabelle 2). Der erneute Trockenstress könnte also eine die deutlichere Erholung bei den von SCHOBER untersuchten Bäumen und ggf. auch bei den von KRÖNER untersuchten Buchen verhindert haben. Generell ist zum Vergleich zu den beiden historischen Untersuchungen von KÖRNER und SCHOBER zu sagen, dass beiden ein sehr begrenzter Untersuchungsumfang zugrunde liegt. Bei KÖRNER sind dies pro Baumart fünf Bäume bei SCHOBER pro Baumart nur ein Baum.

Letztlich zeigen die dargestellten Ergebnisse, dass dendroklimatologische Untersuchungen, die sich lediglich auf die Radialzuwachsdaten am Stammfuss (BHD) konzentrieren, den Zuwachseinbruch zumindest von Buchen und Eichen überschätzen, genauso wie die Erholung überschätzt wird. Da hinsichtlich der Resilienz-Reaktion beide Tendenzen gegenläufig wirken, kann hinsichtlich der generellen Aussage zum Trockenstress allerdings in vielen Fällen von einem geringen Fehler ausgegangen werden. Anders verhält sich dies, wenn die Bäume bereits einen gewissen Schwellenwert überschritten haben und eine Erholung im Kronenbereich gar nicht mehr stattfindet, wie dies bei den Altbuchen der Fall ist. Dann kann die Überschätzung der Erholungsreaktion, wenn lediglich Radialzuwachsdaten auf BHD-Ebene analysiert werden, weitreichende Folgen haben.

Trockenstresskennzahlen in Abhängigkeit von der Wasserverfügbarkeit und der Trockenstress-Intensität

Mit zunehmend knapper Wasserversorgung wurde vor allem für die Buche eine stärker ausgeprägte Trockenstressreaktion beim Radialzuwachs erwartet. Dieses zeigt sich im Hinblick auf das mittlere absolute Matrixpotenzial des Standorts während der Vegetationszeit. Das mittlere absolute Matrixpotenzial kennzeichnet die allgemeine Wasserverfügbarkeit am jeweiligen Standort (=Aridität des Standorts). Von den vorgestellten Trockenstresskennzahlen, kann jedoch nur für die Erholungsreaktion eine Abschwächung derselben entlang des Wasserversorgungsgradienten am Stromberg beobachtet werden (vgl. Anhang 15). Die Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes sind entweder insgesamt zu gut wasserversorgt, um hier bereits eine Tendenz erkennen zu können, oder aber Wachstumsfaktoren, welche mit der Wasserverfügbarkeit bzw. dem Matrixpotenzial an diesen Standorten nicht oder nur in geringem Maße im Zusammenhang stehen, beeinflussen dort den Radialzuwachs so stark, dass sich entlang des Gradienten keine eindeutige Tendenz zeigt. Denkbar wäre z.B. ein stärkerer Einfluss von selten auftretenden, extrem niedrigen Temperaturen im Winter oder Frühjahr.

Das *absolute* Matrixpotenzial des Standorts beeinflusst die Trockenstressreaktion der Untersuchungsbäume im Stromberg weniger stark als das *relative* Matrixpotenzial im Trockenjahr. Dieses relative Matrixpotenzial wird quantifiziert über den trockenjahr-spezifischen Matrixpotenzial-Index. Er kann als Maß für die Trockenstress-Intensität in einem spezifischen Trockenjahr und an einem spezifischen Standort herangezogen werden. Recovery- und Resistenz-Werte gehen mit zunehmender Trockenstress-Intensität zurück (signifikanter Zusammenhang, vgl. Anhang 16). Abbildung 60 zeigt, dass der Matrixpotenzial-Index in den Trockenjahren 1976 und 2003 an den Untersuchungsstandorten sehr unterschiedlich ausgeprägt war und die Unterschiede zwischen den Standorten vor allem in der Region „Schwarzwald“ (LT, HW, SU und AT) erheblich sind. Besonders bei den beiden nordexponierten Standorten (Lautenbach, LT und Heuweiler HW) ist die Aussagekraft des Matrixpotenzial-

Indexes allerdings begrenzt. An diesen beiden Standorten fallen die Kurven der modellierten Matrixpotenzialwerte auch in den Trockenjahren nicht wesentlich unter die Kurven der feuchteren Jahre (vgl. Anhang 9, bei Heuweiler nur 1976). Am Stromberg, wo insgesamt deutlich weniger Niederschläge fallen, liegen die mittleren Matrixpotenzialwerte in der Vegetationszeit in den beiden Trockenjahren ca. 40 % unter den langjährigen Mittelwerten, im Schwarzwald ca. 60 % darunter. Die Trockenjahre hatten also in der „trockeneren“ Untersuchungsregion eine geringere Änderung der mittleren Matrixpotenzialwerte zur Folge, was aufgrund der nicht linearen Zusammenhänge (vgl. Abbildung 11) zu erwarten ist.

Aus dem Vergleich der beiden Analysen, also der Trockenstressreaktion in Abhängigkeit von der absoluten Wasserverfügbarkeit bzw. der Trockenstressreaktion in Abhängigkeit von der Trockenstress-Intensität, lässt sich folgern, dass die mittlere Wasserverfügbarkeit an einem Standort nur einen Einfluss auf die kurzfristige Erholung, nicht jedoch auf die Resilienz der beiden Baumarten hat. Dabei verläuft die Erholung umso langsamer, je geringer die mittlere Wasserverfügbarkeit des Standortes ist. Die Trockenstress-Intensität wirkt sich dagegen auf die Erholung *und* auf die Resilienz der beiden Baumarten gegenüber Trockenstress aus. Die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten sind bezüglich der Zusammenhänge zur Wasserverfügbarkeit oder zur Trockenstress-Intensität gering.

Da zwischen den Resilienz-Werten und den mittleren absoluten Matrixpotenzialwerten kein Zusammenhang nachgewiesen werden konnte, spielt die Anpassung beider Baumarten an die mittlere Wasserverfügbarkeit des Standortes offensichtlich eine entscheidende Rolle. Die Erholungsreaktion verläuft auf den trockeneren Standorten zwar langsamer, trotzdem werden auf diesen Standorten nicht grundsätzlich geringere Radialzuwachs niveaus im Vergleich zu vor der Trockenheit erreicht. Eine signifikante Reduktion der Resilienz geht allerdings mit der standortsspezifischen Trockenstress-Intensität einher. D.h. Buchen und Eichen zeigen sowohl an trockenen als auch an besser wasserversorgten Standorten eine prozentual ähnliche Reduktion ihrer Radialzuwächse nach der Trockenheit im Vergleich zu vor der Trockenheit.

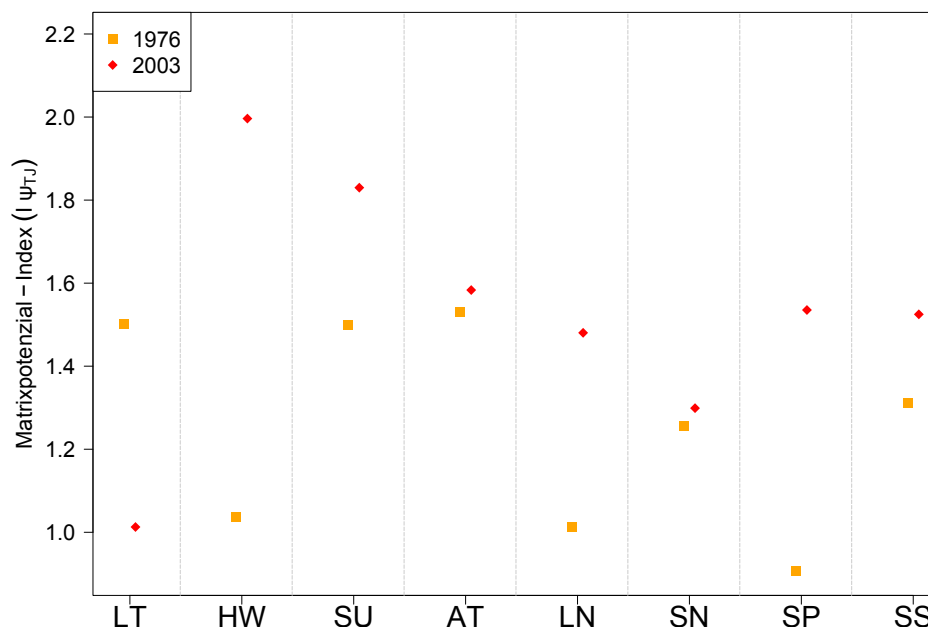


Abbildung 60: Trockenjahr-spezifischer Matrixpotenzial-Index ($I\Psi_{TJ}$) der einzelnen Untersuchungsstandorte in den Trockenjahren (TJ) 1976 und 2003.

Dargestellt ist der Quotient der mittleren Matrixpotenzialwerte in den Jahren 1976 und 2003 geteilt durch das mittlere Matrixpotenzial im Beobachtungszeitraum 1971 bis 2010. Die Werte wurden über die sechs Zeitreihen pro Standort (drei Bodenprofile x zwei Baumarten) für die Vegetationszeit (April bis September) gemittelt. Ein Wert von 1.5 bedeutet beispielsweise, dass das Matrixpotenzial im Trockenjahr um 50 % niedriger (höherer negativer Wert) war als im langjährigen Mittel (1971-2010).

Die Trockenstress-Intensität war an fast allen Standorten im Trockenjahr 2003 höher als im Trockenjahr 1976.

Beitrag der Auswertung der Trockenstresskennzahlen zur Beantwortung der Hypothesen

Die Hypothese, dass der Dickenzuwachs der Eiche in den Trockenjahren gegenüber dem der Buche eine höhere Resistenz aufweist (H7), kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse nur eingeschränkt verifiziert werden, da - wenn alle Untersuchungsstandorte zusammengefasst werden (Abbildung 48) - nur die Unterschiede im Trockenjahr 1976 signifikant sind. Daneben zeigen auf der Ebene der Einzelstandorte (Anhang 13) nur die Nordhänge im Schwarzwald, und der Altbestand auf dem Nordhang im Stromberg (Sternenfels Nordhang), einen signifikant stärkeren Zuwachseinbruch der Buche. Die schnellere Erholungsreaktion zeigt, entgegen dem zweiten Halbsatz in Hypothese 7 nicht die Eiche, sondern die Buche. Allerdings ist diese schnellere Erholungsreaktion der Buche in beiden Trockenjahren nur für das Kollektiv der Jungbestände signifikant (Abbildung 49 c und d). Auch auf der Ebene der Untersuchungsstandorte ist 1976 die schnellere Erholungsreaktion der Buchen in den Jungbeständen noch sehr deutlich, jedoch nur für die Standorte Heuweiler und Sulzburg auch signifikant (Anhang 13, linke Spalte). Was das Trockenjahr 2003 angeht ist die schnellere Erholungsreaktion noch in drei von vier Jungbeständen zu beobachten, allerdings nur für Heuweiler signifikant (Anhang 13, rechte Spalte). Bezüglich der Erholungsreaktion der Altbestände ist nach 1976 für das Kollektiv und für die Einzelstandorte kein Unterschied zwischen den beiden Baumarten festzustellen (Abbildung 49 a und Anhang 13, linke Spalte). Die mit der Hypothese postulierte, schnellere Erholungsfähigkeit der Eichen trifft jedoch insoweit zu, als dass sich nur die Eichen in den Altbeständen nach 2003 (geringfügig) erholen, während die Buchen innerhalb des Erholungszeitraumes auf dem Niveau des Zuwachseinbruches verbleiben (Abbildung 49 b). Dieser für das Kollektiv der Altbestände signifikante Unterschied ist auf Einzelstandortebene jedoch nur für den Standort Sternenfels-Südhang signifikant (Anhang 13, rechte Spalte). Zusammenfassend kann bezüglich Hypothese 7 am Untersuchungsmaterial nachgewiesen werden, dass bis zu einem Alter von mindestens 30 Jahren eine schnellere Erholungsreaktion der Buche (und nicht der Eiche!) nach Trockenjahren erfolgt. Ab einem Alter von ca. 130 Jahren zeigen die Buchen dagegen auf sehr trockenen Standorten oder in aufgelichteten Beständen deutlich eingeschränkte Erholungsreaktionen im Vergleich zur Eiche.

Anhand der hier vorgestellten Radialzuwachsanalysen kann *nicht* auf eine *generell* höhere Resilienz der Eiche gegenüber Trockenstress im Vergleich zur Buche geschlossen werden (H8). Das hohe Reaktions-, bzw. Erholungspotenzial der Buche nach Trockenheit führt trotz des stärkeren Zuwachseinbruchs im Trockenjahr bereits nach zwei (1976) bzw. vier (2003) Jahren Erholungszeitraum zu annähernd gleichen Resilienz-Werten. Eingeschränkt wird diese Aussage jedoch zum einen aufgrund der Trockenstressreaktionen an den gut wasserversorgten Nordhängen im Schwarzwald. Dort hatten die Buchen des Altbestandes (Lautenbach) nach beiden Trockenjahren deutlich geringere Resilienz-Werte. Außerdem verdeutlicht die Trockenstressreaktion entlang der Stammachse, dass die Buchen-Altbestände nach 2003 im oberen Stammbereich eine sehr eingeschränkte Erholungsreaktion und damit auch eine deutliche geringere Resilienz als die Eichen zeigen. Obwohl beide Kollektive an den Untersuchungsstandorten ähnliche Bestockungsgrade hatten (Abbildung 53), bleibt offen ob die geringen Bestockungsgrade bei Buchen und Eichen aufgrund der unterschiedlichen Ökologie und Physiologie der beiden Baumarten unterschiedliche Wirkungen hinsichtlich deren Resilienz im Kronenbereich haben.

Zwar ist die Erholungsreaktion von der mittleren Wasserverfügbarkeit des Standorts abhängig, nicht jedoch die Resilienz des Radialzuwachses der beiden Baumarten. Deshalb kann die Hypothese, dass bei geringerer Wasserversorgung des Standorts vor allem für die Buche mit geringerer Resistenz gerechnet werden muss (H9) nicht bestätigt werden. Entscheidender als die mittlere Wasserverfügbarkeit des Standorts für die gesamte Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen ist die Trockenstress-Intensität. Zwischen Trockenstress-Intensität und Zuwachseinbruch ist kein signifikanter Zusammenhang nachweisbar, allerdings fällt die

Erholungsreaktion mit zunehmender Trockenstress-Intensität signifikant langsamer aus und das in der Erholungsphase erreichte Zuwachsniveau geht mit zunehmender Trockenstress-Intensität signifikant zurück. Dabei sind jedoch die Unterschiede zwischen Buchen und Eichen gering.

5.3.2.5 Anhand der Klima-Wachstumsbeziehungen

Klima-Wachstumsbeziehungen der untersuchten Buchen und Eichen im Vergleich zu anderen europäischen Studien der beiden Baumarten

Eine Übersicht zu den im Zeitraum 2006-2014, veröffentlichten dendrochronologischen Untersuchungen für Buchen und Eichen in Europa ist hinsichtlich der gefundenen Witterungs-Wachstums-Beziehungen im Anhang 21 a bis d dargestellt. Eine derartige Zusammenfassung darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die Vergleichbarkeit mit dem hier vorgestellten Material nur eingeschränkt möglich ist, da große Unterschiede z.B. hinsichtlich der Auswahl der Standorte, Bestände und Untersuchungsbäume oder hinsichtlich des Analysezeitraumes und der angewandten Methoden bestehen. Jede Untersuchung wurde letztendlich mit einer eigenen Fragestellung durchgeführt und jeder Untersuchung liegt ein spezielles, auf die jeweilige Fragestellung zugeschnittenes Untersuchungsdesign zugrunde. Mehrere der aufgeführten Arbeiten versuchen einen Gradienten hinsichtlich der bestimmenden Wachstumsfaktoren abzubilden (z.B. FONTI, GARCÍA-GONZÁLEZ 2008; FRIEDRICHS ET AL. 2009; POPA ET AL. 2013; SCHARNWEBER ET AL. 2011; SCHRÖDER ET AL. 2009). Andere Untersuchungen widmen sich dagegen spezielleren Fragestellungen und betrachten die Witterungs-Wachstums-Beziehungen nur am Rande. So analysieren z.B. ZADWORNÝ ET AL. (2014) die unterschiedliche Trockenstress-Sensitivität von gepflanzten und naturverjüngten Eichenbeständen, während DROBYSHEV ET AL. (2010) an den Zusammenhängen zwischen Witterung und Mastjahren interessiert sind. In der Zusammenschau wurde versucht eine Vergleichbarkeit zumindest in Bezug auf die angegebene Jahresmitteltemperatur und die durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme der Untersuchungsstandorte herzustellen. Wo die Angaben zu diesen beiden Größen für den Bezugszeitraum der Klimanormale (1961 – 1990) nicht direkt der genannten Publikation zu entnehmen waren, wurden diese Größen anhand der angegebenen Koordinaten aus dem Rasterdatensatz CRU CL 2.0 (online verfügbar unter: <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/tmc/>) extrahiert. Dieser Datensatz liefert die genannten Größen in einem Raster von 10 x 10 Minuten (NEW ET AL. 2002), d.h. die Seitenlänge des jeweils ausgewählten Rasters beträgt in Nord-Süd-Richtung immer ca. 18.52 km in Ost-West-Richtung hängt die Seitenlänge des Rasters vom jeweiligen Breitengrad ab. Auf der Höhe von Freiburg (48. Breitengrad) beträgt die Seitenlänge des Rasters in Ost-West-Richtung ca. 12.4 km, auf der Höhe von Stockholm (58. Breitengrad) dagegen nur noch ca. 9.5 km. Wenn keine Koordinaten für den Untersuchungsstandort in den Publikationen angegeben waren, wurde das entsprechende Gitter im Rasterdatensatz über die Koordinaten anhand des abgedruckten Kartenmaterials oder aufgrund der genannten Örtlichkeiten mittels GOOGLE EARTH ermittelt und hinsichtlich der möglichen Verwendung der CRU-Daten plausibilisiert.

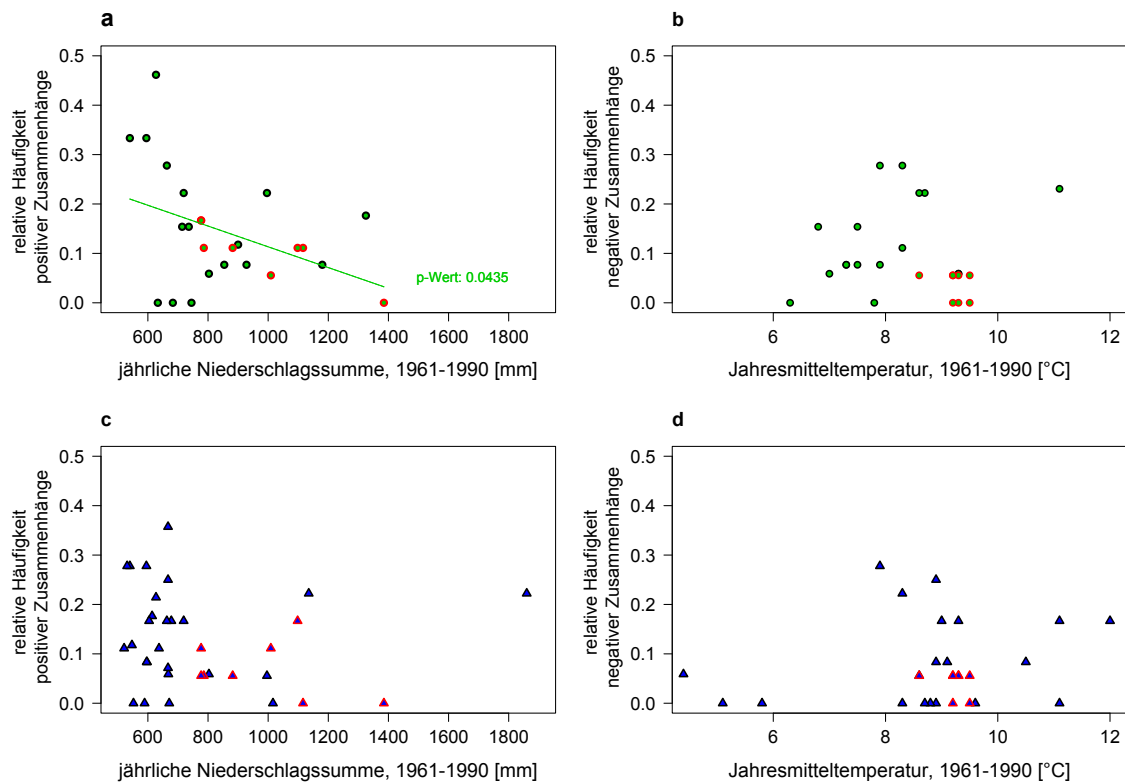


Abbildung 61: Relative Häufigkeiten von signifikanten Klima-Witterungsbeziehungen für Buchen und Eichen in Europa

Die relativen Häufigkeiten mit den monatlichen Niederschlagssummen sind über den mittleren jährlichen Niederschlagssummen des jeweiligen untersuchten Standorts aufgetragen, die relativen Häufigkeiten mit den mittleren Monatstemperaturen über den Jahresdurchschnittstemperaturen. Klima-Witterungsbeziehungen zu den monatlichen Niederschlagssummen sind links (a und c) und zu den mittleren Monatstemperatur rechts (b und d) dargestellt. Oben sind die Klima-Witterungsbeziehungen für Buchen (a und b) und unten für Eichen (c und d) gezeigt. Datengrundlage ist die Auswertung aktueller Publikationen und die hier vorgestellte Untersuchung. Die rot umrandeten Symbole stellen die relativen Häufigkeiten für das eigene Material dar (vgl. hierzu auch Anhang 21 a bis d). Signifikante Zusammenhänge ($p < 0.05$) sind mit einer Ausgleichsgeraden gekennzeichnet.

Im Vergleich mehrerer europäischer Studien zu den Klima-Witterungsbeziehungen und den Radialzuwächsen von Buchen und Eichen folgen bezüglich der Häufigkeit der festgestellten signifikanten Beziehungen nur die Beziehung zwischen Niederschlägen und Radialzuwachs der Buchen einem signifikant abnehmenden Trend.

Resultierend aus der im Anhang 21 a bis d zusammengefassten Literaturlauswertung und den eigenen Untersuchungsergebnissen wurden die Punktdiagramme in Abbildung 61 generiert. Diese stellen die relative Häufigkeit signifikanter Klima-Wachstumsbeziehungen zwischen den (trendbereinigten) Radialzuwächsen und den Monatswerten von Niederschlag und Temperatur, wie sie aus den *response* oder *correlation functions* resultieren, getrennt für die beiden Baumarten Buche (oben, a und b) und Eiche (unten, c und d) über den mittleren jährlichen Niederschlagssummen und Jahresdurchschnittstemperaturen an den Untersuchungsstandorten dar. Lediglich die Klima-Wachstumsbeziehungen zwischen den (trendbereinigten) Radialzuwächsen der Buchen und den monatlichen Niederschlagssummen (Abbildung 61a) folgen einem schwach signifikant abnehmenden Trend. D.h. höhere mittlere Niederschlagssummen während der Klimanormalperiode haben eine geringere Anzahl signifikanter Klima-Wachstumsbeziehungen zur Folge. Bei allen anderen recherchierten und analysierten Klima-Wachstumsbeziehungen, also dem Radialzuwachs und der monatliche Durchschnittstemperaturen für die Buche (Abbildung 61b), sowie dem Radialzuwachs und der monatliche Niederschlagssummen oder der monatliche Durchschnittstemperaturen für die Eichen (Abbildung 61c und d), sind keine Trends erkennbar.

Insgesamt fällt sowohl bei der Literatur als auch bei den eigenen Analysen auf, dass immer wieder einzelne Monate als „signifikant“ bewertet werden, für die eine physiologische Erklärung kaum gegeben werden kann. So zeigt die *response function*-Analyse für den Radialzuwachs der Eichen an den Standorten Leonbronn und Sternenfels Nordhang beispielsweise einen signifikant positiven Zusammenhang mit der Niederschlagssumme im Monat Februar, was – wenn man davon ausgeht, dass der Bodenwasserspeicher in unseren Breiten im Winter komplett aufgefüllt wird – wenig plausibel erscheint. Trotz der genannten methodischen Schwächen können aus diesen Analysen jedoch Hinweise darauf abgeleitet werden, welche der beiden Baumarten stärker von Trockenheit betroffen ist. Das in dieser Arbeit vorgestellte und analysierte Untersuchungsmaterial (rot umrandete Symbole in Abbildung 61) bestätigt bezüglich der Klima-Wachstumsbeziehungen von Buchen und Eichen die jüngsten europäischen Untersuchungen bzw. widerspricht den bisherigen Arbeiten zu diesem Thema nicht. Die im Vergleich zu den Niederschlägen etwas geringere Übereinstimmung der Temperaturen als Prädiktor in den Klima-Wachstumsfunktionen kann vermutlich auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Hanglagen analysiert wurden, deren „reale“ Temperaturbedingungen von den Rasterdaten abweichen können.

Überprüfung der Klima-Wachstumsbeziehungen anhand der Tageswerte

Die Ergebnisse der auf den Monatswerten basierenden *response functions* wurden mit den Tageswerten als Eingangsparameter und unter Hinzuziehung des Programms CLIMTREG (BECK ET AL. 2013) verifiziert. Insgesamt bestätigt diese Analyse die aufgrund der *response functions* gefundenen Zusammenhänge: Die Buche ist im Vergleich beider Arten die Baumart welche deutlich sensitiver auf Sommerniederschläge reagiert. Hohe Temperaturen im Sommer des laufenden Jahres wirken sich – wenn überhaupt – negativ auf den Radialzuwachs der Buchen, aber kaum auf den der Eichen aus. Hohe Temperaturen im Spätsommer des Vorjahres haben einen im Vergleich zu den Temperaturen des aktuellen Jahres deutlich schwächeren negativen Einfluss auf den Radialzuwachs der Buchen, dies jedoch vor allem in den Altbeständen. Im Vergleich zu den Niederschlägen liefern die Analysen mit dem täglichen Matrixpotenzial- oder REW-Werten ähnliche Ergebnisse. Dass die Verwendung von Bodenwasserhaushaltsdaten im Vergleich zu Witterungsdaten nicht generell zu einer Verbesserung der Vorhersage von Radialzuwachtsdaten beiträgt, finden auch MICHELOT ET AL. (2012, 167) in ihrer Untersuchung an Buchen, Traubeneichen und Kiefern, wobei deren Aussagen auf monatlichen Witterungs- bzw. Bodenwasserdaten basieren. Während sich das Bestimmtheitsmaß des aufgestellten Radialzuwachtsmodells bei der Nutzung des Prädiktors „Intensität des Bodenwasserdefizits“ anstelle der Niederschlagswerte für die Eiche von 34 auf 40 % verbesserte, fiel es bei der Buche von 40 auf 33 % ab.

Die Analyse der Witterungs-Wachstums-Beziehungen mit dem Programm CLIMTREG deckt bei weitem nicht alle möglichen wachstumsbeeinflussenden Faktoren auch im Hinblick auf die analysierten Witterungs- und Bodenwasserhaushaltsdaten ab. So können wenige oder auch nur einen Tag auftretende Extremwerte der Temperaturen starke Reaktionen im Radialzuwachs nach sich ziehen (z.B. Hitze- bzw. Frostschäden). Beispielsweise zeigen die Dendrometermessungen von STANGLER ET AL. (2014), dass außergewöhnliche hohe Temperaturen an drei Tagen im Mai 2010 einen stärkeren Einfluss auf den Radialzuwachs von Zuckerahorn in Kanada hatten, als die ebenfalls beobachteten Trockenjahre 2005, 2007 und 2012.

Aufgrund der auf Tages- und Monatswerten basierenden Klima-Wachstumsbeziehungen kann die Hypothese, dass zwischen den Niederschlägen in der Vegetationsperiode des laufenden Jahres und dem Dickenzuwachs bei der Buche deutlich positivere Zusammenhänge bestehen, als bei der Eiche (H4), bestätigt werden. Vor allem die CLIMTREG-Ergebnisse für die Untersuchungsstandorte am Stromberg (Anhang 18, zweite Seite) bestätigen diese Aussage.

Die Hypothese, dass zwischen den Temperaturen in der Vegetationsperiode und dem Dickenzuwachs bei der Buche deutlich negativere Zusammenhänge bestehen als bei der Eiche (H5), kann nicht uneingeschränkt bestätigt werden. Die Temperaturen im (Spät-) Sommer des Vorjahres wirken sich vor allem negativ auf den Radialzuwachs der Bu-Altbestände aus (siehe Anhang 18, Standorte AT, SN und SS). Bei den Bu-Jungbeständen sind dies jedoch vor allem die Sommertemperaturen des laufenden Jahres (Standorte HW, SU und SP), wobei an einem Standort (LN) der Radialzuwachs von Buchen und Eichen gleichermaßen negativ von den höheren Temperaturen im laufenden Jahr beeinflusst wird.

Die Hypothese, dass Temperatur und Niederschlag einen unmittelbaren und stärkeren Effekt auf den Dickenzuwachs von jungen Buchen und Eichen ausüben, als bei älteren Buchen und Eichen (H6), kann bezüglich der Temperatur bestätigt werden. Die hohen Temperaturen im Sommer des laufenden Jahres hatten einen unmittelbar negativen Einfluss auf den Radialzuwachs der untersuchten Jungbestände, die hohen Temperaturen im Sommer des Vorjahres auf den der Altbestände. Die Niederschläge im Sommer des laufenden Jahres wirken sich dagegen unmittelbar auf den Radialzuwachs von Alt- und Jungbestände aus.

Zu einem ähnlichem Ergebnis bezüglich des Vergleichs der beiden Baumarten kommt auch BONN (BONN 1998) allerdings aufgrund seiner Auswertung zu den Weiserjahren und der Witterungsverhältnisse in diesen, sowie den Vorjahren. „Ein Zusammenhang zwischen Witterung und dem Zuwachs ist bei Buche also deutlicher als bei Eiche ausgeprägt“ (ebenda. S. 64). In Tabelle 14 (ebenda. S. 65) gibt BONN beispielsweise an, dass die Buchen an 16 von 18 untersuchten Standorten 1976 mit einem negativen Weiserjahr reagiert haben und in diesem Jahr der berechnete Klimaindex, ermittelt über die Niederschlagssumme von März bis Juli dividiert durch die mittlere Temperatur im selben Zeitraum, bei lediglich 56.6 % des langjährigen Mittels lag. Der relative Anteil positiver und negativer Weiserjahre ist für die Eiche im Vergleich zur Buche geringer, ebenso jedoch auch die positive und negative Abweichung der Klimaindexwerte vom langjährigen Mittel.

5.4 Diskussion weiterer Aspekte, die Trockenstress-Toleranz und Witterungs-Sensitivität beeinflussen

Trotz der sorgfältigen Auswahl der Untersuchungsbestände konnten verschiedene Aspekte, die hinsichtlich der Trockenstress-Toleranz und Witterungs-Sensitivität der beiden Baumarten eine Rolle spielen, nicht oder nur ungenügend in der vorliegenden Untersuchung berücksichtigt werden. Diese sind:

- Die Mykorrhizierung der Baumarten und deren Einfluss auf die Wasserversorgung der Bäume und damit deren Zuwachs.
- Die Fruktifizierung der Bäume und der Einfluss von Mastjahren auf den Zuwachs (vgl. DROBYSHEV ET AL. 2010; DROBYSHEV ET AL. 2014).
- Der Einfluss von biotischen Schädlingen auf den (Radial-)Zuwachs; die Veränderung der Jahrringbreite und –struktur von Eichen durch den Kahlfraß von Schwammspinner und Frostspanner oder Maikäfern wurde bereits von mehreren Autoren nachgewiesen (vgl. KOLÁŘ ET AL. 2013; ZIEGLER 2004).
- Die Art der Bestandesbegründung; so stellen ZADWORNÝ ET AL. (2014) in einer dendrochronologischen Untersuchung in Westpolen an Stieleichen fest, dass die aus Saat entstandenen Eichenbestände weniger empfindlich auf die Trockenheit reagieren als Bestände, die gepflanzt wurden oder aus Stockausschlag entstanden sind.
- Das Beispiel des kanadischen Zuckerahorns (STANGLER ET AL. 2014) zeigt, dass auch kurzfristige Extremwerte der Temperatur im Einzelfall zu extremen Schwankungen im Radialzuwachs führen können. Solche Effekte können auch für die hier untersuchten

Buchen und Eichen nicht ausgeschlossen werden, sie wurden allerdings in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

- Die genetische Analyse der Chloroplasten-DNA unterstützte die eindeutige Artzuordnung der Traubeneichen. Zwischen den analysierten Markern der Kern-Mikrosatelliten und den Trockenstresskennzahlen konnten keine Zusammenhänge gefunden werden. Da weder für die Buche (BOLTE 2005) noch für die Eiche bislang die Genorte bekannt sind, die eine unterschiedliche Trockenstressresistenzen der Populationen oder Individuen bewirken könnten, kann die baumindividuell unterschiedliche genetische Ausstattung der Bäume zu einer Verzerrung der Ergebnisse hinsichtlich der Trockenstress-Sensitivität der Baumarten geführt haben. Im Falle der mit großer Wahrscheinlichkeit aus Naturverjüngung entstandenen, untersuchten Buchen wäre eine ähnliche genetische Ausstattung zu vermuten. Allerdings zeigen verschiedene Untersuchungen zur genetischen Variabilität in Buchenbeständen, dass diese innerhalb einer Region oftmals größer ist als zwischen verschiedenen Regionen (RAJENDRA ET AL. 2014; WORTEMANN ET AL. 2011). Bei den vermutlich gepflanzten Traubeneichen können dagegen im Zuge der Saatgutgewinnung und der Pflanzenaufzucht unterschiedliche Herkünfte mit unterschiedlicher genetischer Ausstattung vermischt worden sein. Aufgrund der zum Zeitpunkt ihrer Begründung noch eingeschränkten, allgemeinen Transportmöglichkeiten ist bei den Altbeständen jedoch nicht von einem Ferntransport des Saat- oder Pflanzgutes auszugehen, vermutlich stammte dieses aus der Region und wurde in lokalen Pflanzschulen angezogen. Kritischer muss dieser Aspekt zum Zeitpunkt der Begründung der Jungbestände in den 1950er Jahren bewertet werden. Auch nach dem heute gültigen Forstvermehrungsgutgesetz (FoVG) sind die festgelegten Herkunftsgebiete für die beiden Eichenarten recht groß und umfassen fast den gesamten süddeutschen Raum. Für die Trauben- und Stieleiche ist in Baden-Württemberg nur der Oberrheingraben als vom restlichen Landesgebiet abgegrenzte Herkunftsregion ausgeschieden (HINRICHS 2007). Zwar wurden alle in dieser Arbeit untersuchten Eichen genetisch eindeutig der Traubeneiche zugeordnet, dennoch werden diese Eichen eine unterschiedliche genetische Ausstattung der Kern-DNA haben wodurch die Trockenstress-Sensitivität des Einzelbaumes mitbestimmt wird.
- Die bisherigen Durchforstungen in den Beständen und die ggf. unterschiedliche Förderung der einzelnen Baumarten.
- Die kleinstandörtlichen Unterschiede zwischen den Untersuchungsbäumen eines Bestandes, die trotz sorgfältiger Auswahl derselben anhand der Standortseinheiten immer gegeben sind.

5.5 Diskussion des praktischen Nutzens der Ergebnisse für die Forstwirtschaft

Die Untersuchungen zeigen zunächst, dass die Unterschiede zwischen Buchen und Eichen im Radial- und Höhenzuwachs nach Trockenjahren geringer sind als erwartet. Im Detail sind jedoch doch einige Unterschiede zwischen den beiden Baumarten zu erkennen, die im Hinblick auf die zukünftige forstliche Bewirtschaftung der beiden Baumarten in Baden-Württemberg diskutiert werden.

5.5.1 Zukünftige Anbaueignung von Buchen und Eichen

Welche der beiden Baumarten zukünftig vorzuziehen ist, um für länger anhaltende und häufiger auftretende Trockenperioden besser gewappnet zu sein, ist aufgrund des relativ geringen Stichprobenumfangs der Untersuchung und der Unsicherheiten der Klimamodellierung nicht eindeutig zu beantworten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur frei drainierbare Standorte ausgewählt und (vor-)herrschende Bäume untersucht. Auf diesen Standorten waren die Unterschiede zwischen den (vor-)herrschenden Bäumen beider Baumarten im Hinblick auf die Trockenstressreaktion (Resilienz) relativ gering. Es ist jedoch bekannt, dass sowohl die Traubeneiche als auch die Stieleiche schwere Böden mit einem höheren Tonanteil besser erschließen als die Buche (KÖSTLER ET AL. 1968). Die Traubeneiche wird auch als „empfindlich gegenüber hoch anstehendem Grundwasser und stagnierender Nässe“ beschreiben (AAS 1994, 9). Neuere Untersuchungen zur vertikalen Wurzelverteilung machen jedoch deutlich, dass die Unterschiede zwischen den beiden Eichenarten (*Quercus robur* vs. *Quercus petraea*) auch auf tonigen Böden gering sein können (THOMAS 2000). In der vorliegenden Untersuchung wurde durch die Auswahl frei drainierbarer Böden der Vorteil der Eichen, die angenommene bessere Durchwurzelung toniger Böden, bewusst ausgeblendet. Damit spiegelt das Untersuchungsdesign aber nicht die realen Verhältnisse auf vielen Standorten in Baden-Württemberg wieder. Die Konkurrenzvorteile der Traubeneiche gegenüber der Buche werden deshalb auf vielen Standorten in Baden-Württemberg größer sein, als dies die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen. Allerdings weisen die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten im Radialzuwachs der Jahre 1966 und 1980 auch auf eine spezielle Empfindlichkeit der (vor-)herrschenden Traubeneichen gegenüber ausgeprägten Niederschlagsdefiziten im Spätsommer/Herbst des Vorjahres hin. Ob die (vor-)herrschenden Buche ihr Radialzuwachspotenzial nach Trockenjahren wieder ausschöpfen konnten, hing entscheidend von der Höhe und der Verteilung der Niederschläge in der Vegetationszeit der Trockenfolgejahre ab. Sind diese Niederschläge in der ersten Hälfte der Vegetationszeit überdurchschnittlich, wird der Radialzuwachs der Buchen profitieren. Bleiben die Niederschläge in diesen Zeitraum aber aus, wird die Erholungsreaktion der Buchen deutlich leiden und die Traubeneiche kann ggf. profitieren. Allerdings können geringe Niederschläge im Spätsommer und Herbst ebenfalls zu deutlichen Zuwachsrückgängen bei der Traubeneiche im Folgejahr führen, so dass unter den letztgenannten Gegebenheiten keine der beiden Baumarten Vorteile im Hinblick auf den Radialzuwachs (vor-)herrschender Bäume hat.

5.5.2 Trockenstressreaktion in Bu-Ei-Mischbeständen versus Reinbeständen

In dieser Untersuchung konnten keine Mischungseffekte im Hinblick auf die Trockenstressreaktionen der beiden Baumarten nachgewiesen werden, wobei das Untersuchungsdesign auch nicht auf diese spezielle Fragestellung abzielte, sondern explizit nur Mischbestände ausgewählt wurden, um vergleichbare Wachstumsbedingungen für beide Baumarten zu gewährleisten. Vergleichende Untersuchungen zur Trockenstressreaktion zwischen beiden Baumarten in Rein- und Mischbeständen von PRETZSCH ET AL. (2013) in Bayern kommen zum Ergebnis, dass die Mischung zu einer höheren Resistenz und einer höheren Recovery der Buche führt, die nicht auf Kosten der Eiche geht. Für die hier untersuchten Buchen aus Mischbeständen wurde allerdings ein Trockenstress-Muster gefunden, das mit dem in den bayerischen Reinbeständen übereinstimmt (vgl. Kapitel 5.3.2.4). D.h. für die Trockenstressreaktion in Mischbeständen scheinen neben den Mischungsverhältnissen vor allem auch die Standortbedingungen eine entscheidende Rolle zu spielen. Auf Standorten, auf denen die beiden Baumarten eine deutlich unterschiedliche Erschließung des Bodens zeigen, z.B. indem die Traubeneiche auch tiefere Bodenschichten intensiver erschließt, ist auch mit einer differenzierten Trockenstressreaktion zu rechnen. Dies dürften bei der Mischung von Buche und Traubeneiche vor allem die insgesamt weniger wüchsigen Standorte sein. Darauf deuten auch

die Untersuchungen von PRETZSCH ET AL. (2013) bezüglich der höheren Produktivität von Bu-Ei-Mischbeständen hin. Danach wäre eine höhere Produktivität der Mischbestände vor allem auf Standorten gegeben, auf denen beide Baumarten nur geringe Oberhöhen (Bu: 21 m, Ei: 24 m) erreichen. Eine Mischung der beiden Baumarten erscheint also auch vor dem Hintergrund der Trockenstress-Toleranz der Bestände vor allem auf den schlechteren Standorten angezeigt. Ungeachtet dessen bietet die Mischung der beiden Baumarten auch auf besseren Standorten zusätzliche Sicherheiten, v.a. mit Blick auf zukünftige Handlungsoptionen.

5.5.3 Verlängerung der Umtriebszeiten von Buchen und Eichen

Die Ergebnisse der Analysen zum Radialzuwachs und dabei speziell bezüglich der Erholungsreaktion der untersuchten Altbuchen in größeren Stammhöhen sind ein deutlicher Warnhinweis. Die reduzierte Vitalität dieser Bäume wird durch das Absinken der Radialzuwachswerte in der „Erholungsphase“ unter das Niveau des Referenzzeitraumes, ja sogar unter das Niveau des eigentlichen Trockenjahres (vgl. Abbildung 50b) mehr als deutlich. Ob die reduzierte Vitalität Folge des fortgeschrittenen Alters oder der stärkeren Auflichtung in den Altbeständen ist, kann mit dieser Untersuchung jedoch nicht zweifelsfrei geklärt werden.

Die aktuell neu aufgelegte „Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen“ in Baden-Württemberg misst der Bewirtschaftung der Buchenwälder im Dauerwald ein höheres Gewicht als bisher bei (LANDESBETRIEB FORST BADEN-WÜRTTEMBERG, MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ 2014). Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass gerade ältere (und bereits aufgelichtete) Buchenwälder in ihrem Zuwachs verstärkt unter den Folgen der Trockenjahre 1976 und 2003 gelitten haben. Inwiefern vor diesem Hintergrund und den prognostizierten Szenarien der Klimaerwärmung eine weitere Streckung der Haupt- und Endnutzung in Buchenaltbeständen zielführend ist, erscheint zumindest fraglich. Sicherlich müssen die berechtigten Interessen der Gesellschaft in Bezug auf die naturschutzfachlichen Leistungen gerade des öffentlichen Waldes mit abgewogen werden. Bei zunehmender Sommertrockenheit ist davon auszugehen, dass Altbestände, je nach Intensität, Wiederkehr und zeitlicher Abfolge der Trockenjahre, unter Umständen relativ rasch Auflösungserscheinungen zeigen und damit eine schnelle Entwertung der Holzvorräte einhergeht. Ob der Buchen-Stammholzmarkt die dann u.U. sehr rasch auf den Markt kommenden Mengen aufnehmen kann, ist fraglich. Die vorgelegte Untersuchung zeigt jedoch auch sehr deutlich, dass sich die jungen Buchen- und Eichenwälder nach Trockenjahren besser und schneller erholen, so dass vor dem Hintergrund einer gewünschten Klimastabilität der Wälder eine rasche Verjüngung der Altbestände und eine Absenkung der Vorräte vernünftig erscheint.

6 Ausblick und weitere Forschungsfragen

Diese Untersuchung hat die Analyse der Trockenstressreaktion von Traubeneichen und Buchen an ausgewählten Standorten in Baden-Württemberg im Fokus. Da die Frage, ob nun Trauben- oder Stieleiche eine größere Trockenstress-Resistenz aufweisen nach wie vor umstritten scheint (vgl. Kapitel 2.1.3), ist dieses sicherlich ein Feld, das – auch vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Nährstoffansprüche der beiden Baumarten – noch weiter untersucht werden sollte. Neben der Eichenart und deren Nährstoffansprüchen spielt hier unter Umständen das eiszeitliche Refugialgebiet und die genetische Variabilität der Eichenherkünfte eine entscheidende Rolle (BONFILS ET AL. 2013). Auch das möglicherweise unterschiedliche Verhalten der beiden Eichenarten bezüglich der Durchwurzelung von tonigen und/oder zumindest temporär wasserstauenden Böden wird Rückkoppelungen auf die Trockenstress-Resistenz der beiden Arten haben. Trotz der Neuentwicklungen in diesem Bereich (LEI, BAUHUS 2010), stellt die Analyse von Durchwurzelungsintensität und Durchwurzelungstiefe bei älteren Bäumen allerdings nach wie vor eine methodische Herausforderung dar.

Die wichtige Frage, ob unterschiedliche Provenienzen von Buchen und Eichen Trockenperioden besser überstehen, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht bearbeitet werden. Jahrring- und Zellstrukturanalysen an Bäumen von (ehemaligen) Herkunftsversuchen bieten, gerade für die Eichen, einen idealen Ansatz um dieses Thema im Rahmen eines Forschungsprojektes genauer zu untersuchen. Die Provenienzversuche wurden zwar ursprünglich mit dem Ziel angelegt, die Qualitätsentwicklung von verschiedenen Herkünften zu untersuchen, können jedoch heute ohne weiteres auch im Hinblick auf die Trockenstresstoleranz der Herkünfte dendroklimatologisch ausgewertet werden. Erste Ansätze hierzu finden sich z.B. bereits bei dem in Kapitel 2.4.3 erwähnten Stieleichen-Provenienzversuch von CIESLAR (1923). Neben den Buchen- und Eichen-Herkünften aus niederschlagsärmeren Regionen in Europa, sollten auch autochthone Bestände von ausgewiesenen Trockenstandorten in Baden-Württemberg für eine derartige Untersuchung herangezogen und, sofern noch nicht geschehen, entsprechende Versuchsflächen angelegt werden.

Eng verknüpft mit der Anpassungsfähigkeit verschiedenen Provenienzen an sich ändernde Klimaverhältnisse ist die Frage, welche Gene in Waldbäumen für unterschiedliche Trockenstressreaktionen verantwortlich sind. Über Untersuchungen zur „Genexpression“ oder „Genassoziation“ wird versucht Genorte die für bestimmte Stoffwechsel oder bestimmte phänotypische Merkmale verantwortlich sind zu lokalisieren (FUSSI ET AL. 2014). Für mediterrane Kiefernarten sind bereits Gene bekannt die in Verbindung mit Trockenheitstoleranz stehen (siehe FUSSI ET AL. 2014 bezüglich der Arten und die dort zitierte Literatur). HOMOLKA ET AL. (2013) fanden entlang eines klimatischen Gradienten in Österreich drei Kandidatengene für Trockenstress an Traubeneiche und ein Kandidatengen an Stieleiche. Die Autoren vermuten, dass die höhere genetische Differenzierung der Traubeneiche gegenüber der Stieleiche an den Kandidatengenen mit dem höheren Anpassungspotenzial derselben unter ariden Bedingungen zusammenhängt. Auch für Buche wurden Unterschiede in den Einzelnukleotid-Polymorphismen (Single Nucleotide Polymorphism, SNP) entlang eines Niederschlagsgradienten in Sachsen und Sachsen-Anhalt gefunden und Zusammenhänge mit der Anpassung an Trockenstress vermutet (SEIFERT ET AL., 2012). Ob die klinale Veränderung der SNPs jedoch tatsächlich eine genetische Anpassung darstellt, oder letztlich nur auf die hohe neutrale genetische Variabilität der Buche zwischen verschiedenen Populationen zurückgeführt werden kann ist noch nicht geklärt (SEIFERT 2011, 68f).

Die intra- oder inter-annuelle Analyse der Veränderungen in der Zellstruktur kann weitere Hinweise bezüglich der Trockenstress-Resistenz verschiedener Baumarten liefern, war jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit. Gerade für Untersuchungsbaume aus den gemäßigten Breiten, scheint

der tiefere Blick in die intra-annualen Jahrringstrukturen jedoch ein nicht zu unterschätzendes Informationspotenzial darzustellen (vgl. hierzu FONTI ET AL. 2010; FONTI, GARCÍA-GONZÁLEZ 2008; ZWEIFEL ET AL. 2006). Während für verschiedene Eichenarten schon mehrere Untersuchungen vorliegen (z.B. EILMANN ET AL. 2006; GRIČAR ET AL. 2013; TARDIF, CONCIATORI 2006; TULIK 2014), gibt es sehr wenige Arbeiten zur Buche (Ausnahmen: Z'GRAGGEN 1992; SASS, ECKSTEIN 1995). Aufgrund der programm- und messtechnischen Fortschritte in diesem Bereich und effizienter Probenpräparationstechniken, wird es in naher Zukunft jedoch möglich sein, gerade die Buche, die im Hinblick auf den intra-annualen Wachstumsverlauf offensichtlich die größere Variabilität aufweist, näher zu analysieren.

Die Literaturrecherche zur Frage des zeitlichen Verlaufs des Höhenwachstums innerhalb des Jahres bei älteren Bäumen führte zu einem unbefriedigenden Ergebnis. Aufgrund der messtechnischen Schwierigkeiten, so sind kontinuierliche Messungen im Zeitabstand von Tagen bzw. maximal einer Woche im Wipfelbereich der Bäume notwendig, fehlen hierzu verlässliche Aussagen. Versuche im Rahmen dieser Arbeit mit Outdoor-Kamerasystemen und Referenzlängenmessungen mit einem Theodolit und Laser-Entfernungsmesser waren vielversprechend, müssen hinsichtlich Systemaufbau und v.a. digitaler Auswertungsmöglichkeiten aber noch weiter verfeinert werden. Schwierigkeiten bereiten außerdem die offensichtlich großen Schwankungen zwischen den Einzelbäumen eines Bestandes, so dass zunächst Voruntersuchungen durchzuführen sind, um die notwendige Stichprobenanzahl pro Bestand zu ermitteln. Diese Fragen konnten innerhalb dieser Arbeit nicht geklärt werden. Aufgrund der großen Bedeutung des Höhenwachstums für die Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Baumarten, erscheint es aber notwendig und vielversprechend zukünftig verstärkte Forschungsaktivitäten in diesem Bereich zu entwickeln.

In der vorliegenden Arbeit wurde lediglich ein Ausschnitt im tatsächlich vorhandenen Wasserverfügbarkeitsgradienten der beiden Baumarten bearbeitet (vgl. Kapitel 1.2 und 5.1.3.). Obwohl die Trockenstress-Reaktion auf ariden Standorten nicht notwendigerweise stärker ausgeprägt sein muss, als auf humiden Standorten (WEBER ET AL. 2013), würde eine ähnlich gelagerte Untersuchung entlang des gesamten Verbreitungsspektrums der beiden Baumarten sicherlich weitere interessante Einblicke zum Konkurrenzverhalten der beiden Baumarten und dessen Beeinflussung durch Trockenstress ermöglichen. Ein interessanter Teilaspekt dabei wäre zu sehen, in wie weit sich ggf. die Erholungsreaktion der Buche mit zunehmender Humidität des Standorts verbessert. Die Frage nach Schwellenwerten an der z.B. bestimmte Trockenstress-Intensität zu unumkehrbaren Vitalitätsverlusten führen, so dass für eine der beiden Baumarten mit erhöhten Mortalitätsraten zu rechnen ist konnte mit dem vorhandenen Material nicht ausreichend beantwortet werden. Eine breitere Ausgangsbasis im Datenmaterial bietet hier zusätzliche Chancen, wobei observatorische Studien dabei immer an ihre Grenzen stoßen werden (KÖLLING, SCHMIDT 2013). Neben einem weiter gefassten Wasserverfügbarkeitsgradienten bieten sich im Hinblick auf die Trockenstressreaktionen älterer Bäume sogenannte Dach-Experimente an, um das „trockene Ende“ und eine kurzfristige Veränderung im Wasserhaushalt künstlich abzubilden. Gerade die Mischungssituation von Buche und Eiche scheint für ein solches Experiment auch im Hinblick auf die physiologischen Fragestellungen interessant.

7 Zusammenfassung

Die Frage der Klimasensitivität von Buchen und Eichen wird von unterschiedlichen forstwissenschaftlichen Fachrichtungen verschieden beantwortet. Während standorts- und vegetationskundlich orientierte Arbeiten vor allem das weite Verbreitungsgebiet der Buche hervorheben und daraus auf eine hohe Anpassungsfähigkeit der Baumart bei sich änderndem Klima schließen, zeigen Untersuchungen auf der Grundlage der physiologischen Prozesse vielfach eine höhere Trockenstressempfindlichkeit für die Buche als für die Eiche.

Die vorliegende Arbeit beleuchtet die Frage der Witterungsabhängigkeit und der Trockenstresstoleranz der beiden Baumarten vor dem Hintergrund retrospektiver Wachstumsanalysen. Hierzu wurden entlang eines Wasserverfügbarkeitsgradienten in Baden-Württemberg acht Buchen-Eichen-Mischbestände in zwei verschiedenen Altersklassen (\pm 60-jährige Bestände und \pm 120-jährige Bestände) und zwei unterschiedlichen Regionen ausgewählt (Westabfall des Schwarzwaldes: gut wasserversorgte Standorte wegen vergleichsweise hoher mittlerer Niederschlagssummen, Stromberg: temporär angespannte Wasserversorgung wegen vergleichsweise geringer mittlerer Niederschlagssummen). Es wurden nur frei drainierbare Standorte ausgewählt. In jedem Bestand wurden fünf vorherrschende Baumpaare, d.h. fünf Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und fünf Traubeneichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.), eingeschlagen und deren Höhen- und Dickenwachstum mittels Stammanalysen untersucht. Hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen Höhen- bzw. Dickenwachstum und Trockenstress wurde auf die Jahre 1976 und 2003 fokussiert, bezüglich der Zusammenhänge zwischen Dickenwachstum und Witterung wurde schwerpunktmäßig der Zeitraum 1971 bis 2010 analysiert. Für den letztgenannten Zeitraum wurden Daten aus einem Bodenwasserhaushaltsmodell (LWF-BROOK-90) herangezogen. Dieses Modell wurde anhand der vor Ort und im Labor erhobenen Bodenparameter und der rekonstruierten, räumlich hoch aufgelösten, täglichen Witterungsdaten parametrisiert.

Der Höhenzuwachs wurde in vier ca. 60-jährigen Beständen nach den Trockenjahren 1976 und 2003 analysiert. Der jährliche Höhenzuwachs der Buchen unterscheidet sich an den besser wasserversorgten Standorten teilweise deutlich vom Höhenzuwachs der Traubeneichen. Während die Buchen im Trockenjahr einen überdurchschnittlichen Zuwachs und eine ausgeprägte Stressreaktion in den darauffolgenden ein bis zwei Jahren zeigen, kann an den jährlichen Höhenzuwachsen der Traubeneichen keine Reaktion auf das Trockenjahr festgestellt werden. Am trockensten Standort zeigen die Höhenzuwachsverläufe der beiden Baumarten, vor allem nach dem Trockenjahr 1976, große Ähnlichkeiten. Nur an diesem Standort kann anhand des Vergleichs von einzelbaumweise modellierten mit beobachteten Wachstumskurven eine deutliche, über mehrere Jahre anhaltende Reaktion auf die Trockenjahre gezeigt werden, wobei die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten gering sind.

Die Korrelationen und Regressionen mit monatlichen und täglichen Witterungs- und Bodenwasserdaten zeigen, dass das Dickenwachstum der untersuchten Buchen deutlicher vom Niederschlag und der Bodenfeuchte während des Zeitraums der Jahrringbildung abhängig war als das der Traubeneichen. Entlang des untersuchten Wasserverfügbarkeitsgradienten sind jedoch keine gerichteten Tendenzen zu erkennen. Für die Eiche zeigen nur die Südhänge im Schwarzwald, also nicht die insgesamt trockensten Standorte, eine signifikante und stabile Korrelation zwischen Radialzuwachs und Niederschlag/Bodenfeuchte im Sommer des laufenden Jahres. Der Radialzuwachs der Buchen wird außerdem signifikant negativ von hohen Temperaturen im Sommer des laufenden Jahres (Jungbestände) oder des Vorjahres (Altbestände) beeinflusst, für die Traubeneichen sind die Abhängigkeiten von den Temperaturen dagegen marginal.

Die Analyse der Trockenstressreaktion anhand von Trockenstresskennzahlen zeigt weitere interessante Unterschiede zwischen den beiden Baumarten auf. Die Trockenstresskennzahlen erleichtern den Baumarten- und Jahresvergleich, sie geben Auskunft zur Stärke des Zuwachseinbruches (Resistenz), zur Erholung (Recovery) und zur Belastbarkeit (Resistenz). Der Radialzuwachs der Buchen bricht einerseits in den Trockenjahren 1976 und 2003 signifikant stärker ein, als derjenige der Traubeneichen, andererseits erholen sich die jungen Buchen auch signifikant schneller vom Zuwachseinbruch als die Traubeneichen. Dies führt in den untersuchten Jungbeständen sowohl nach 1976 als auch nach 2003 zu einer höheren Resilienz der Buchen, wobei dieser Niveauunterschied zwischen den beiden Baumarten nicht signifikant ist. Anders verhalten sich Einbruch und Erholung in den Altbeständen. Dort zeigen die Traubeneichen eine insgesamt höhere Belastbarkeit als die Buchen (1976 signifikant, 2003 nicht signifikant). Während die Buchen in den Altbeständen 1976 eine ähnlich Erholungsreaktion wie die Eichen zeigen, verläuft die Erholungsreaktion der beiden Baumarten 2003 signifikant unterschiedlich. Die Traubeneichen zeigen in den Trockenfolgejahren einen Anstieg im Vergleich zum Trockenjahr, bei den untersuchten Buchen bleibt dieser aus. Noch deutlicher werden die Unterschiede zwischen den beiden Baumarten in den Altbeständen, wenn die Trockenstressreaktionen anhand der Radialzuwächse in höheren Stammhöhen analysiert werden. Die ausbleibende Erholungsreaktion der Alt-Buchen nach 2003 kann nicht als abnehmende Vitalität dieser Bäume interpretiert werden, sondern muss im Zusammenhang mit den geringen Niederschlägen in den Trockenfolgejahren gesehen werden.

Das Erholungsvermögen von Buchen und Traubeneichen in der Region Stromberg geht entlang des Wasserverfügbarkeitsgradienten in ähnlichem Umfang zurück. Die Trockenstress-Intensität, d.h. der relative Rückgang des Matrixpotenzials im Verhältnis zum langjährigen Mittel am jeweiligen Standort, wirkt sich dagegen auf die Erholung *und* die Belastbarkeit der beiden Baumarten in der Region Stromberg aus. Auch dabei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Buchen und Traubeneichen festgestellt werden. Die Trockenstress-Intensität hat demnach im Stromberg eine größere Wirkung auf die Trockenstressreaktion beider Baumarten als die generelle Wasserversorgung des Standorts (Aridität). Im Schwarzwald zeigte sich weder anhand der absoluten noch anhand der relativen Wasserversorgung der Standorte im Trockenjahr eine graduelle Veränderung der Trockenstressreaktion.

Der Vergleich der Radialzuwachskurven beider Baumarten im gemeinsamen Überlappungszeitraum 1962 bis 2010 zeigt einen auffallend synchronen Verlauf. Gegensätzliche Zuwachsreaktionen der beiden Baumarten, mit ansteigendem Radialzuwachs der Buchen und abfallendem Radialzuwachs der Eichen, sind nur in den Jahren 1965/66 (beide Regionen) und 1979/80 (nur Stromberg) deutlich zu beobachten. In diesen beiden Jahren können keine vom langjährigen Mittel abweichenden Monatswerte der Witterung beobachtet werden, allerdings sind die beiden Vorjahre (1965 und 1979, nur Stromberg) durch außergewöhnliche Trockenphasen im Spätsommer/Herbst gekennzeichnet. Daneben zeigen die Witterungsanalysen der besonders zuwachskräftigen Jahre für die Buche (1987 und 1988), dass diese - mehr als die Traubeneiche - in der Lage ist, hohe Niederschläge während der Hauptwachstumsperiode (v.a. im Juni) unmittelbar in hohes Dickenwachstum umzusetzen.

Die Ergebnisse werden mit Bezug zu den aufgestellten Hypothesen diskutiert:

Das Höhenwachstum der jungen Buchen hat im Vergleich zu den jungen Traubeneichen unter den Trockenjahren nicht signifikant stärker gelitten. Im Gegenteil in beiden Trockenjahren zeigen die Buchen sogar ein kräftigeres Höhenwachstum als die Traubeneichen und auch nach den Trockenjahren sind nur in Ausnahmefällen signifikante Unterschiede zwischen Buchen und Traubeneichen vorhanden. Auch die Höhenwachstumsverläufe der beiden Baumarten weichen an den Untersuchungsstandorten nach den Trockenjahren nicht signifikant von ihren „normalen“ Verläufen ab, so dass aufgrund der Ergebnisse *nicht* gezeigt werden konnte, dass junge

Traubeneichen von den benachbarten Buchen aufgrund von selten auftretenden, extremen Trockenjahren später überwachsen werden. Anders kann dies bei häufiger auftretenden Trockenjahren und auf Standorten aussehen, die nicht von beiden Baumarten in ähnlicher Weise durchwurzelt werden. Anzeichen für eine möglicherweise, stärkere Betroffenheit im Höhenwachstums der Buchen finden sich an allen vier Untersuchungsstandorten nach dem Trockenjahr 2003 (Abbildung 35b).

Zwischen dem Dickenzuwachs und hohen Niederschlägen bzw. hohen Bodenfeuchtigkeitswerten in der Vegetationsperiode des laufenden Jahres bestehen an den untersuchten Standorten für die Buchen deutlich engere positive Zusammenhänge als für die Traubeneichen. Hohe Temperaturen im Sommer des laufenden oder des Vorjahres wirken sich dagegen stärker negativ auf den Radialzuwachs der Buchen, als auf den der Traubeneichen aus. Eine im Vergleich zu den Jungbeständen verzögerte Wachstumsreaktion der Altbestände ist insofern nur hinsichtlich der Temperatur bei den Buchenbeständen zu beobachten. Auf hohe Niederschläge und hohe Bodenfeuchtigkeit reagierten junge und ältere Buchen gleichermaßen und unmittelbar im selben Jahr.

Die Traubeneiche in den Jungbeständen wies in beiden Trockenjahren eine signifikant höhere Resistenz, d.h. einen geringeren Zuwachseinbruch, auf als die Buche. Allerdings zeigte die Buche in den Jungbeständen eine signifikant schnellere Erholungsreaktion, so dass die Unterschiede in der Resilienz zwischen beiden Baumarten in den Jungbeständen nicht signifikant sind. In den Altbeständen verfügen die Traubeneichen gegenüber den Buchen über eine höhere Resistenz (1976 signifikant), über die schnellere Erholungsreaktion (2003 signifikant) und damit über die höhere Resilienz (1976 signifikant).

Entlang des abgebildeten Wasserverfügbarkeitsgradienten sind keine gerichteten Unterschiede zwischen Buchen und Traubeneichen in ihrer Trockenstressreaktion zu beobachten. Die Trockenstress-Intensität ist für die Trockenstressreaktion beider Baumarten entscheidender als die generelle Wasserversorgung (Aridität) des Standorts.

Diese Ergebnisse müssen vor folgendem Hintergrund interpretiert werden:

Die untersuchten Standorte in Baden-Württemberg reichen nicht an die jeweiligen Grenzen der natürlichen Baumartenverbreitung heran. Mit einer zunehmenden Klimaveränderung rücken viele Buchen- und Eichen-Standorte in Baden-Württemberg näher an diese Grenzen heran, wobei die Trockenstressreaktionen der beiden Baumarten dann evtl. anders aussehen.

Die ausgewählten Untersuchungsbäume stockten auf frei drainierbaren Böden, die beide Baumarten gleichermaßen erschließen. In Baden-Württemberg sind Standorte mit höheren Tonanteilen im Unterboden, die zumindest temporäre Staunässe aufweisen können, verbreitet. Auf diesen Standorten werden sich die Unterschiede in der Trockenstressreaktion zwischen Buchen und Traubeneichen aufgrund ihrer unterschiedlichen Durchwurzelungsmöglichkeiten ausgeprägter darstellen.

Die vorgestellten, auf retrospektiven Analysen basierenden Unterschiede zwischen Buchen und Traubeneichen sind damit im Hinblick auf zukünftige Klimaszenarien und deren räumliche Bedeutung in Baden-Württemberg als „Minimalszenario“ anzusehen.

8 Summary

The question of climate sensitivity of beech and oak provides disparate answers from different forest science disciplines. Research with a focus on site conditions and/or vegetation analysis, emphasizes the wide range of beech and conclude on a high adaptability of this tree species in a changing climate while studies based on physiological processes frequently show that beech has a higher drought sensitivity than oak.

The presented work highlights the issue of dependency on weather conditions and drought stress tolerance of the two species in the context of retrospective growth analysis. To this end, along a water gradient in Baden-Württemberg eight mixed stands with beech and oak were selected in two different age groups (± 60 years old and ± 120 years old) within two different regions (western part of the Black Forest representing an abundant water-supply due to high average precipitation totals and Stromberg where temporary water deficits are common due to low average precipitation totals). Only stands on free draining soils were selected. In every stand five predominant tree pairs were felled, five beeches (*Fagus sylvatica* L.) and five sessile oaks (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). The height and diameter growth of these trees was investigated using stem analysis. The study focused on the years 1976 and 2003 regarding the relationship between height/diameter growth and drought stress. With reference to the relationships between radial growth and weather, the period 1971 to 2010 was analyzed. Data were taken from a soil water balance model (LWF-BROOK-90) for the latter period. This model was parameterized with soil data collected from the field and subsequently analyzed in the laboratory coupled with reconstructed high spatial resolution daily weather data.

The height increment after the drought years of 1976 and 2003 were analyzed in the four 60 year old stands. The annual height increment of the beech trees differs on the sites with higher water supply, in some cases significantly from the height growth of sessile oak. Beech shows an above-average growth in the drought year and a pronounced stress response in the following one to two years, no clear reaction due to the drought year can be determined from the annual height growth of sessile oak. At the driest site the height growth curves of the two tree species show large similarities, especially after the drought year of 1976. Based on the comparison of individually modeled and observed tree growth curves only at this location a distinct drought reaction, which persists over several years, can be shown. Nevertheless, the differences between the two species are low.

The correlations and regressions with monthly and daily weather and soil water data show that the diameter growth of beech depends more on precipitation and soil moisture during the period of annual ring formation than that of sessile oak. Along the water gradient no directional trends were observed. For the oaks, only the southern slopes in the Black Forest (i.e. not the driest investigated sites) show a significant and stable correlation between radial growth and precipitation/soil moisture during the summer of the same year. The radial growth of beech is also affected significantly negatively by high temperatures in the summer of the same year (young stands) or of the previous year (old stands). For sessile oak, temperature dependence is marginal.

The analysis of drought stress response based on drought stress indicators exhibits further interesting differences between the two species. Drought stress indicators facilitate the comparison of a tree species' radial growth reaction in different drought years. They provide information about the strength of the growth depression (resistance), the recovery and the resilience (post-drought level divided by pre-drought level). On the one hand the radial growth of beech, in the drought years 1976 and 2003 has a significantly lower resistance than that of sessile oak, while on the other, the young beech trees also recover significantly faster than sessile oak.

This results for the examined 60 year old stands after both drought years (1976 and 2003) in a higher resilience of beech when compared with sessile oak, although the difference between the two species is not significant. Resistance and recovery are quite different in the old stands. In these stands sessile oak shows a higher resilience than beech (in 1976 significant, in 2003 not significant). While the old beech in 1976 shows a similar recovery as oak, recovery after 2003 is significantly different. Sessile oak shows an increase in radial growth compared to the drought year. This increase does not occur for the old beech trees. These differences between the two species become even more obvious when the drought stress indicators are analyzed on the basis of the radial growth at higher stem heights. The absence of recovery of the old beech trees after 2003 cannot be interpreted as a decreasing vitality within the old stands, but must to be viewed in the context of low precipitation in these years.

The recovery potential of beech and sessile oak in the Stromberg region decreases along with a decreasing water gradient (i.e. increasing aridity) to a similar extent. The drought stress intensity, defined as the relative decline of the matrix potential in relation to the long-term average at each location, affects the recovery *and* resilience of the two tree species in the Stromberg region. This result could be interpreted as a more pronounced effect of relative drought stress intensity than of the general aridity of the site on the drought stress reaction of the two tree species. For both gradual changes (recovery and resilience) along with the drought stress intensity (of the sites), no significant differences between beech and sessile oak were found. For the plots in the Black Forest drought stress responses showed no significant correlations, neither with the relative water supply (drought stress intensity) nor with the general water supply of the sites (aridity).

The comparison of the radial growth curves of both tree species in the common overlap period 1962-2010 shows a strikingly synchronous course. Contrasting growth responses of the two species, for example increasing radial growth of beech and decreasing radial growth of sessile oak, are clearly observed only in the years 1965/66 (both regions) and 1979/80 (Stromberg only). In these two years there is no weather anomaly when comparing with the long-term average monthly values. However, the two preceding years (1965 and 1979, Stromberg only) are characterized by uncharacteristic dry periods in late summer/autumn. In addition, the analysis of the weather conditions during the particularly superior growth years for beech (1987 and 1988), show that this species - more than sessile oak - is able to turn expressed rainfalls during the main growing season (especially in June) directly into radial growth.

The results are discussed with respect to the hypotheses:

The height growth of young beech trees has not suffered significantly more in and after the drought years compared to the young sessile oak trees. On the contrary, in both drought years beech shows even stronger height growth than sessile oak. After the drought years only in exceptional cases, significant differences between beech and sessile oak exist. At the study sites after the drought years the height growth curves of two tree species do not deviate significantly from their "normal" curves. Therefore, it was *not* possible to show with the results of this study that young sessile oaks are overgrown by neighboring beeches earlier because of exceptional, extreme drought events. This may be different when drought years occur more frequently and on sites that are not penetrated in the same way by the rooting system of both tree species. Signs for a possibly greater effect of drought on the height growth of beech can be found at all four investigated sites after the drought in 2003 (Figure 35b).

At all studied sites, there are distinctly higher positive correlations between radial growth and rainfall or soil moisture in the vegetation period of the same year for beech than for sessile oak. High temperatures in the summer of the same or the previous year however have a stronger negative effect on the radial growth of beech, than of sessile oak. A delayed growth reaction of the old stands compared with the young stands is observed only regarding temperature in beech

stands. High precipitation and abundant soil moisture had a similar and immediate effect on both beech age groups.

In the young stands sessile oak showed in both drought years a significant higher resistance than beech. In these stands beech also showed a significantly faster recovery reaction. Therefore, in the young stands no significant difference in resilience between two tree species exists. In the old stands sessile oak has compared with beech: a higher resistance (1976 significant), a faster recovery (2003 significant) and thus a higher resilience (1976 significant).

No differences between beech and sessile oak in their drought stress response could be observed along the water gradient. For both tree species the drought stress intensity is more critical than the general water supply (aridity) of the site.

These results must be interpreted considering the following background information:

The investigated sites in Baden-Württemberg do not reach the limits of natural tree species distribution for beech and sessile oak. In a changing climate many sites covered with beech and oak in Baden-Württemberg are forecasted to approach these limits. Under such conditions the drought stress reaction of the two species may possibly appear different.

The selected trees were located on free drained soils which are penetrated by both species in more or less the same manner. Temporarily water logged sites with a higher portion of clay in the subsoil are common in Baden-Württemberg. On these sites the differences in the drought stress reaction between beech and sessile oak due to their different rooting system and rooting power will be more pronounced.

The presented distinctions between beech and sessile oak are based on retrospective growth analysis and should be considered in relation to future climate change and spatial significance as "minimal scenario" in Baden-Württemberg.

9 Literatur

- AAS, G. (1994): *Quercus petraea* (Mattuschka) Leiblein, 1784. In: Roloff, A., P. Schütt u. Weisgerber (Hrsg.) (1994): Enzyklopädie der Holzgewächse. Handbuch und Atlas der Dendrologie. Landsberg am Lech.
- AAS, G. u. K. FRIEDRICH (1991): Untersuchung zur morphologischen Unterscheidung von Stiel- und Traubeneicheln. In: Forstw. Cbl. 110, S. 349–357.
- AAS, G., B. MÜLLER, HOLDENRIEDER O. u. M. SIEBER (1997): Sind Stiel- und Traubeneiche zwei getrennte Arten? In: AFZ/Der Wald 52, H. 18, S. 960–962.
- ALBERT, M. u. M. SCHMIDT (2010): Dynamik der Standort-Leistungs-Beziehungen von Buche, Eiche, Fichte, Kiefer und Douglasie unter Klimaveränderungen in Deutschland. In: Deutscher Verband Forstlicher Versuchsanstalten - Sektion Ertragskunde (Hrsg.) (2010): Beiträge zur Jahrestagung 2010, Körbecke am Möhnesee (NRW).
- ALBRECHT, A., U. KOHNLE u. J. NAGEL (2012): Parametrisierung und Evaluierung von BWinPro für Baden-Württemberg anhand waldwachstumskundlicher Versuchsflächendaten. Freiburger Forstliche Forschung 51.
- ALDINGER, E., W. HÜBNER, H.-G. MICHIELS, M. SCHREINER u. M. WIEBEL (1998): Überarbeitung der Standortkundlichen regionalen Gliederung im Südwestdeutschen Standortkundlichen Verfahren. In: Mitt. Ver. Forstl. Standortkunde und Forstpflanzenzüchtung, H. 39, S. 5–71.
- ALDINGER, E. u. H.-G. MICHIELS (1997): Baumarteneignung in der forstlichen Standortskartierung Baden-Württemberg. In: AFZ/Der Wald, H. 5, S. 234–238.
- ANONYMUS (2002): Lehrgangsmappe für den standortkundlichen Referendarlehrgang.
- ARBEITSGRUPPE BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart.
- ARBEITSKREIS KLIWA (2011a): Klimawandel in Süddeutschland - Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, Monitoringbericht 2011. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen.
- ARBEITSKREIS KLIWA (2011b): Klimawandel in Süddeutschland - Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, Monitoringbericht 2011 - Temperatur, Zusätzliche Auswertungen für die KLIWA-Untersuchungsgebiete. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen.
- ARBEITSKREIS KLIWA (2011c): Klimawandel in Süddeutschland - Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, Monitoringbericht 2011 Niederschlag, Zusätzliche Auswertungen für die KLIWA-Untersuchungsgebiete. Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen.
- ARBEITSKREIS KLIWA (2012a): Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum.
- ARBEITSKREIS KLIWA (2012b): Klimawandel im Süden Deutschlands. Ausmaß - Auswirkungen - Anpassung.
- ARBEITSKREIS STANDORTSKARTIERUNG (1996): Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching bei München.

- AREND, M., T. KUSTER, M. S. GÜNTHARDT-GOERG, M. DOBBERTIN, M. AREND, T. KUSTER, M. S. GÜNTHARDT-GOERG u. M. DOBBERTIN (2011): Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*) // Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). In: *Tree Physiology* 31,H. 3, S. 287–297.
- AUER, L. V. (2007): Ökonometrie. Eine Einführung. Berlin [u.a.].
- BACHMANN, M. (1998): Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen. Methodische Untersuchung in Bergmischwäldern. Forstliche Forschungsberichte München. München.
- BACKHAUS, K., B. ERICHSON, W. PLINKE u. R. WEIBER (2011): Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. Berlin [u.a.].
- BARBAROUX, C.; BRÉDA, N.; DUFRÊNE, E. (2003): Distribution of above-ground and below-ground carbohydrate reserves in adult trees of two contrasting broad-leaved species (*Quercus petraea* and *Fagus sylvatica*). In: *New Phytologist* 157 (3), S. 605–615.
- BARTSCH, N., A. DENGLER u. E. RÖHRIG (1992): Der Wald als Vegetationsform und seine Bedeutung für den Menschen. Mit 48 Tabellen. Hamburg [u.a.].
- BECK E. and LÜTTGE U. (1990) Streß bei Pflanzen, *Biologie in unserer Zeit* 20, 237–244.
- BECK W. (2011) Impact of drought and heat on tree and stand vitality – results of the study commissioned by the Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection, in MAATEN-THEUNISSEN M., SPIECKER H., GÄRTNER H., HELLE G. and HEINRICH I. (Eds) *TRACE - Tree Rings in Archäologie, Klimatologie und Ökologie*, pp. 20–27.
- BECK, W., T. G. M. SANDERS u. U. POFAHL (2013): CLIMTREG: Detecting temporal changes in climate–growth reactions – A computer program using intra-annual daily and yearly moving time intervals of variable width. In: *Dendrochronologia* 31,H. 3, S. 232–241.
- BECKER, M., T. M. NIEMINEN u. F. GÉRÉMIA (1994): Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. In: *Ann. For. Sci.* 51,H. 5, S. 477–492.
- BENITO GARZÓN, M., R. SÁNCHEZ DE DIOS u. H. SAINZ OLLERO (2008): Effects of climate change on the distribution of Iberian tree species. In: *Applied Vegetation Science* 11,H. 2, S. 169–178.
- BERGÈS, L., R. CHEVALIER, Y. DUMAS, A. FRANC u. J. M. GILBERT (2005): Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variations in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. In: *Ann. For. Sci.* 62,H. 5, S. 391–402.
- BIONDI, F. (1997): Evolutionary and moving response functions in dendroclimatology. In: *Dendrochronologia*,H. 15, S. 139–150.
- BIONDI, F. u. F. QEADAN (2008): Inequality in paleorecords. In: *Ecology* 89,H. 4, S. 1056–1067.
- BIONDI, F. u. K. WAIKUL (2004): DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. In: *Computers & Geosciences* 30,H. 3, S. 303–311.
- BOHN, U., G. GOLLUB, C. HETTWER, H. WEBER, Z. NEUHÄUSLOVÁ, T. RAUS u. H. SCHLÜTER (2000): Karte der natürlichen Vegetation Europas; Map of the Natural Vegetation of Europe.
- BÖHNER, J. u. O. ANTONIC (2009): Land-Surface Parameters Specific to Topo-Climatology. In: Hengl, T. u. H. I. Reuter (Hrsg.) (2009): *Geomorphometry. Concepts, software, applications*. Amsterdam, Oxford, S. 195–226.

- BÖHNER, J., H. DIETRICH u. A. RINGELER (2009): Regionalisierung von Klimabasisdaten für die Landesfläche Baden-Württembergs und Erstellung einer SAGA-GIS basierten scriptfähigen und menüfähigen Applikation zur problemorientierten Generierung von Klimaflächendaten auf der Basis von IPCC-Szenarien für den Zeitraum 2020-2100. Statusbericht zur Forschungsk Kooperation der FVA Baden-Württemberg und der Universität Hamburg. unveröffentlicht.
- BOLTE, A. (2005): Zur Zukunft der Buche in Mitteleuropa. Die klimatische Anpassungsfähigkeit der "Mutter des Waldes". In: AFZ/Der Wald 60,H. 20, S. 1077–1078.
- BOLTE, A., P. IBISCH, A. MENZEL u. A. ROTHE (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. Anpassung der Wälder an den Klimawandel. In: AFZ/Der Wald 63,H. 15, S. 800–8003.
- BONFILS, P., M. AREND, T. KUSTER, P. JUNOD u. M. S. GÜNTHARDT-GOERG (2013): Die Eiche ist robust. Die Eiche im Umweltwandel (Teil 3): physiologische Prozesse. In: Wald und Holz,H. 4, S. 27–31.
- BONFILS, P., T. KUSTER, P. FONTI, M. AREND, P. VOLLENWEIDER, P. JUNOD u. M. S. GÜNTHARDT-GOERG (2013): Die Eiche reagiert plastisch. Die Eiche im Klimawandel, Teil 2: Trockenheit und Anpassung. In: Wald und Holz,H. 3, S. 45–49.
- BONN, S. (1998): Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen/Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. Dresden.
- BONN, S. (2000): Konkurrenzdynamik in Buchen/Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. In: Allg. Forst- und Jagdztg. 171,5 - 6, S. 81–88.
- BONTEMPS, J.-D., J. C. HERVÉ, P. DUPLAT u. J.-F. DHÔTE (2012): Shifts in the height-related competitiveness of tree species following recent climate warming and implications for tree community composition: the case of common beech and sessile oak as predominant broadleaved species in Europe. In: Oikos 121,H. 8, S. 1287–1299.
- BORCHERT, R. (1975): Endogenous Shoot Growth Rhythms and Indeterminate Shoot Growth in Oak. In: Physiologia Plantarum 35,H. 2, S. 152–157.
- BORCHERT, R. (1976): Differences in shoot growth patterns between juvenile and adult trees and their interpretation based on systems analysis of trees. In: Acta horticulturae 56, S. 123–130.
- BÖSCH, B. (2002): Neue Bonitierungs- und Zuwachshilfen. In: (2002): Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft. FVA-Forschungstage 5. - 6. Juli 2001. Baden-Württemberg, S. 266–276.
- BOSCAGLI A. (1982) The starch content in *Fraxinus ornus* L. during the yearly cycle. Histological observations, *Giornale botanico italiano* 116, 41–49.
- BOURIAUD, O., N. BRÉDA, J. L. DUPOUEY u. A. GRANIER (2005): Is ring width a reliable proxy for stem-biomass increment? A case study in European beech. In: Can. J. For. Res. 35,H. 12, S. 2920–2933.
- BRAUN H. J. (1982) *Lehrbuch der Forstbotanik*. Fischer, Stuttgart, New York.
- BRAUN, S. u. W. FLÜCKIGER (2013): Wie geht es unserem Wald? 29 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU, Ergebnisse von 1984 bis 2012, Bericht 4.
- BRÉDA, N., H. COCHARD, E. DREYER u. A. GRANIER (1993): Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. In: Ann. For. Sci. 50,H. 6, S. 571–582.
- BRÉDA, N. u. A. GRANIER (1996): Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). In: Annales des Sciences Forestières 53,2-3, S. 521–536.

- BRESSEM, U. u. VON STEEN A. (2012): Eichensterben - Erkrankungsschub 2011. Eichenkomplexerkrankung. In: AFZ/Der Wald 67,H. 17, S. 24–27.
- BRIFFA, K. R. u. E. R. COOK: Methods of Response Function Analysis. In: Cook, E. R. u. Kairiukstis L.A (Hrsg.): Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht, Boston, London, S. 240–247.
- BRIFFA, K. R. u. P. D. JONES (1990): Basic Chronology Statistics and Assessment. In: Cook, E. R. u. Kairiukstis L.A (Hrsg.): Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences. Dordrecht, Boston, London, S. 137–152.
- BRZEZIECKI, B. u. F. KIENAST (1994): Classifying the life-history strategies of trees on the basis of the Grimian model. In: Contrasts between biologically-based process models and management-oriented growth and yield models 69,1–3, S. 167–187.
- BUBERL, H. G., K. VON WILPERT, G. TREFZ-MALCHER, E. E. HILDEBRAND u. M. WIEBEL (1994): Der chemische Zustand von Waldböden in Baden-Württemberg.
- BUNDESFORSCHUNGSZENTRUM FÜR WALD (05.08.2014): Lexikon waldschädigende Luftverunreinigungen und Klimawandel. <http://www.luftschadstoffe.at/>.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT: Bundeswaldinventur². Alle Ergebnisse und Berichte: Ergebnisdatenbank: 2.01.8: Waldfläche [ha] nach Land und Baumartengruppe. www.bundeswaldinventur.de (Zugriff am 24.04.2014).
- BUNN, A. G. (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). In: Dendrochronologia 26,H. 2, S. 115–124.
- BUNN, A. G., E. JANSMA, M. KORPELA, R. D. WESTFALL u. J. BALDWIN (2013): Using simulations and data to evaluate mean sensitivity (ζ) as a useful statistic in dendrochronology. In: Dendrochronologia 31,0 // 3, S. 250–254.
- BURGER, H. (1926): Untersuchungen über das Höhenwachstum verschiedener Holzarten. In: Mitteilungen der Schweizerischen Centralanstalt für das forstliche Versuchswesen IXV. Band, S. 29–158.
- BURGER, H. (1939): Holz, Blattmenge und Zuwachs. IV. Mitteilung. Ein 80jähriger Buchenbestand. In: Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das forstliche Versuchswesen, XXI. Band, S. 307–348.
- BURSCHEL, P. u. J. HUSS (2003): Grundriss des Waldbaus. Ein Leitfaden für Studium und Praxis : 207 Tabellen. Stuttgart.
- CARMEAN, W. (1972): Site Index Curves for Upland Oaks in the Central States. In: Forest Science 18, S. 109–120.
- CAVIN, L., E. P. MOUNTFORD, G. F. PETERKEN u. A. S. JUMP (2013): Extreme drought alters competitive dominance within and between tree species in a mixed forest stand. In: Functional Ecology, S. n/a.
- CIESLAR A. (1923) Untersuchungen über die wirtschaftliche Bedeutung der Herkunft des Saatgutes der Stieleiche, *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 49, 7–149.
- CLIMATE SERVICE CENTER GERMANY: Klimawissen - Vergleichendes Lexikon. http://www.climate-service-center.de/033538/index_0033538.html.de (Zugriff am 05.08.2014).
- COCHARD, H., N. BRÉDA, A. GRANIER u. G. AUSSENAC (1992): Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Q. pubescens* Willd, *Q. robur* L). In: Ann. For. Sci. 49,H. 3, S. 225–233.

- COLLET, C., F. COLIN u. F. BERNIER (1997): Height growth, shoot elongation and branch development of young *Quercus petraea* grown under different levels of resource availability. In: *Ann. For. Sci.* 54, H. 1, S. 65–81.
- COOK, E. R. u. KAIRIUKSTIS L.A (Hrsg.) (1990): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences.* Dordrecht, Boston, London.
- COOK, E. R. u. K. PETERS (1981): The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. In: *Tree-Ring Bulletin*, H. 41, S. 45–55.
- COOK, E. R., S. SHIYATOV u. V. MAZEPA: Estimation of the Mean Chronology (1990). In: Cook, E. R. u. Kairiukstis L.A (Hrsg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences.* Dordrecht, Boston, London, S. 123–133.
- CORANDER, J. u. P. MARTTINEN (2006): Bayesian identification of admixture events using multilocus molecular markers. In: *Molecular Ecology* 15, H. 10, S. 2833–2843.
- CORANDER, J., P. MARTTINEN, J. SIREN u. J. TANG (2008): Enhanced Bayesian modelling in BAPS software for learning genetic structures of populations. In: *BMC Bioinformatics* 9, H. 1, S. 539.
- CORANDER, J., J. SIRÉN u. E. ARIAS (2008): Bayesian spatial modeling of genetic population structure. In: *Computational Statistics* 23, H. 1, S. 111–129.
- ČUFAR K., PRISLAN P., LUIS M. u. GRIČAR J. (2008) Tree-ring variation, wood formation and phenology of beech (*Fagus sylvatica*) from a representative site in Slovenia, SE Central Europe, *Trees* 22, 749–758.
- CZAJKOWSKI, T. (2006): Zur zukünftigen Rolle der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in der natürlichen Vegetation. - waldökologische Untersuchungen zur Buchen-Naturverjüngung an der östlichen Buchenwald-Verbreitungsgrenze. Dissertation. Göttingen.
- CZAJKOWSKI, T., B. AHRENDTS u. A. BOLTE (2009): Critical limits of soil water availability (CL-SWA) in forest trees-an approach based on plant water status. In: *Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research* 59, H. 2, S. 87–94.
- CZAJKOWSKI, T. u. A. BOLTE (2006): Unterschiedliche Reaktion deutscher und polnischer Herkünfte der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Trockenheit. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 177, H. 2, S. 30–40.
- CZAJKOWSKI, T., T. KOMPA u. A. BOLTE: Zur Verbreitungsgrenze der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. In: *Forstarchiv* 77, H. 2006, S. 203–216.
- DAMMANN, I., M. KUHR, T. FRIEDHOFF, U. PAAR u. J. EICHHORN (2009): Methoden zur Vermessung der Triebblängen von Buchen und Eichen. In: *Forst und Holz* 64, H. 10, S. 26–31.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (15.11.2012): WebWerdis - Weather Request and Distribution System. https://werdis.dwd.de/werdis/start_js_JSP.do (Zugriff am 15.11.2012).
- DEUTSCHER WETTERDIENST (30.05.2014): Wetterlexikon. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_wetterlexikon&_nfls=false.
- DITTMAR, C., J. EWALD u. W. ELLING (2005): Die vermeintliche Steuerung des Blattverlustes der Buche (*Fagus sylvatica* L.) durch die Witterung. Stellungnahme aus mathematischer und statistischer Sicht zu „Die Steuerung des sogenannten ‚Blattverlustes‘ der Buche (*Fagus sylvatica* L.) durch die Witterung“ (GRUBER 2004, AFJZ 175/4–5: S. 83–94). In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 176, 11/12, S. 220–228.
- DROBYSHEV, I., M. NIKLASSON, O. EGGERTSSON, H. LINDERSON u. K. SONESSON (2008): Influence of annual weather on growth of pedunculate oak in southern Sweden. In: *Ann. For. Sci.* 65, H. 5.

- DROBYSHEV, I., M. NIKLASSON, M. J. MAZEROLLE u. Y. BERGERON (2014): Reconstruction of a 253-year long mast record of European beech reveals its association with large scale temperature variability and no long-term trend in mast frequencies. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 192–193, H. 0, S. 9–17.
- DROBYSHEV I., ÖVERGAARD R., SAYGIN I., NIKLASSON M., HICKLER T., KARLSSON M. u. SYKES M. T. (2010) Masting behavior and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden // Masting behaviour and dendrochronology of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in southern Sweden, *Forest Ecology and Management* 259, 2160–2171.
- DUPOUEY, J. L. u. V. BADEAU (1993): Morphological variability of oaks (*Quercus robur* L, *Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Quercus pubescens* Willd) in northeastern France: preliminary results. In: *Ann. For. Sci.* 50, Supplement, S. 35s-40s.
- EBERT, H.-P. (2002): Die Behandlung von häufig vorkommenden Baumarten (Hauptbaumarten). Rottenburg am Neckar.
- EDER W. u. B. ROSE (1995): Waldbauliche Bedeutung der heimischen Eichenarten in Rheinland-Pfalz. In: Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (1995): Genetik und Waldbau unter besonderer Berücksichtigung der heimischen Eichenarten. Tagungsbericht über die 22. Internationale Tagung der Arbeitsgemeinschaft für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung vom 18. bis 20. Oktober 1994, S. 1–21.
- EILMANN, B. u. A. RIGLING (2012): Tree-growth analyses to estimate tree species' drought tolerance. In: *Tree Physiology* 32, S. 178–187.
- EILMANN, B., P. WEBER, A. RIGLING u. D. ECKSTEIN (2006): Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. In: *Dendrochronologia* 23, H. 3, S. 121–132.
- ELLENBERG, H. (1963): *Vegetation Mitteleuropas*.
- ELLENBERG, H. u. C. LEUSCHNER (1996): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 5. Auflage, Ulmer, Stuttgart.
- ELLENBERG, H. u. C. LEUSCHNER (2010): *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*. 6. Auflage, Ulmer, Stuttgart.
- ELLENBERG, H., H. E. WEBER, R. DÜLL, V. WIRTH u. W. WERNER (2003): *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa - Datenbank*. Göttingen.
- EPRON, D. u. E. DREYER (1993): Long-term effects of drought on photosynthesis of adult oak trees [*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.] in a natural stand. In: *New Phytologist* 125, H. 2, S. 381–389.
- EUFORGEN (2009): Distribution map of Pedunculate oak (*Quercus robur*). www.euforgen.org (Zugriff am 21.07.2014).
- FAHRMEIR, L., T. KNEIB u. S. LANG (2009): *Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg.
- FEUILLAT, F., J. L. DUPOUEY, D. SCIAMA u. R. KELLER (1997): A new attempt at discrimination between *Quercus petraea* and *Quercus robur* based on wood anatomy. In: *Canadian Journal of Forest Research* 27, S. 343–351.
- FONTI, P., G. VON ARX, I. GARCÍA-GONZÁLEZ, B. EILMANN, U. G. W. SASS-KLAASSEN, H. GÄRTNER u. D. ECKSTEIN (2010): Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. In: *New Phytologist* 185, H. 1, S. 42–53.

- FONTI, P. u. I. GARCÍA-GONZÁLEZ (2008): Earlywood vessel size of oak as a potential proxy for spring precipitation in mesic sites. In: *Journal of Biogeography* 35, H. 12, S. 2249–2257.
- FONTI, P., O. HELLER, P. CHERUBINI, A. RIGLING u. M. AREND (2013): Wood anatomical responses of oak saplings exposed to air warming and soil drought. In: *Plant Biology* 15, S. 210–219.
- FORSCHUNGSZENTRUM WALDÖKOSYSTEME (2010): Decision Support System - Wald und Klimawandel. Hintergründe - Risikobeurteilung. <http://www.dss-wuk.de/hintergrund/risikobeurteilung/>.
- FORSTLICHE VERSUCHS- UND FORSCHUNGSANSTALT BADEN-WÜRTTEMBERG: Der Wald in Baden-Württemberg - Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2. http://www.fva-bw.de/indexjs.html?http://www.fva-bw.de/monitoring/bui/bwi/bwi2_b.php (Zugriff am 23.05.2014).
- FORWARD, D. F. u. N. J. NOLAN (1964): Growth and morphogenesis in the canadian forest species. VII: Progress and controll of longitudinal growth of branches in *Pinus resinosa* Ait. In: *Can. J. Bot.* 42, H. 7, S. 923–950.
- FRIEDRICHS, D. A., V. TROUET, U. BÜNTGEN, D. C. FRANK, J. ESPER, B. NEUWIRTH u. J. LÖFFLER (2009): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. In: *Trees - Structure and Function* 23, H. 4, S. 729–739.
- FRITTS, H. C. (2001): *Tree rings and climate*. Caldwell, N.J.
- FRITTS, H. C. u. D. J. SHATZ (1975): Selecting and Characterizing Tree-Ring Chronologies for Dendroclimatic Analysis. In: *Tree-Ring Bulletin* 1975, H. 35, S. 31–40.
- FUSSI, B.; CREMER, E.; KONNERT, M. (2014): Auf der Suche nach anpassungsrelevanten Genen bei Waldbäumen. In: *LWF-Wissen* (74), S. 27–31.
- GAERTIG, T., H. SCHACK-KIRCHNER u. E. E. HILDEBRAND (2001): Steuert Gasdurchlässigkeit im Boden Feinstwurzeldichte und Vitalität bei Eiche? In: *AFZ/Der Wald* 56, H. 25, S. 1344–1347.
- GEBHART, S. (2012): Abgrenzung des Marks vom innersten Jahrring bei der Eiche. Ausarbeitung eines aktuellen Themas am Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften.
- GIEGER, T. u. F. M. THOMAS (2002): Effects of defoliation and drought stress on biomass partitioning and water relations of *Quercus robur* and *Quercus petraea*. In: *Basic and Applied Ecology* 3, H. 2, S. 171–181.
- GILLNER S., RÜGER N., ROLOFF A. u. BERGER U. (2013): Low relative growth rates predict future mortality of common beech (*Fagus sylvatica* L.), *Forest Ecology and Management* 302, 372–378.
- GRIČAR, J. (2010): Xylem and phloem formation in Sessile oak from Slovenia in 2007. In: *Wood Res* 55, H. 4, S. 15–22.
- GRIČAR, J., M. DE LUIS, P. HAFNER u. T. LEVANIČ (2013): Anatomical characteristics and hydrologic signals in tree-rings of oaks (*Quercus robur* L.). In: *Trees* 27, H. 6, S. 1669–1680.
- GRUBER, F. (2001): Wipfelwachstum von Altbuchen (*Fagus sylvatica* (L.) auf einem Kalkstandort (Göttingen/Södderich) in Abhängigkeit von der Witterung. I. Grundlegende Zuwachsmuster. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 172, H. 10, S. 183–189.
- GRUBER, F. (2001): Wipfelwachstum von Altbuchen (*Fagus sylvatica* (L.) auf einem Kalkstandort (Göttingen/Södderich) in Abhängigkeit von der Witterung. II. Steuerung des Zuwachses durch die Witterung. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 172, H. 11, S. 193–202.
- GRUBER, F., T. E. MANN, M. KUHR u. J. EICHHORN (2003): Kronenwachstum von Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.) in Abhängigkeit von der Witterung auf einem kalkbeeinflussten Basaltstandort Zierenberg. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 175, 4/5, S. 70–76.

- GRUNDMANN, B., S. BONN u. A. ROLOFF (2008): Cross-dating of highly sensitive Common beech (*Fagus sylvatica* L.) tree-ring series with numerous missing rings. In: *Dendrochronologia* 26, H. 2, S. 109–113.
- GÜNTHER, M. (1954): Untersuchungen über das Ertragsvermögen der Hauptholzarten im Bereich verschiedener Standortseinheiten des württembergischen Neckarlandes. Wissenschaftliche Abhandlung zur Erlangung des Doktorgrades der Staatwirtschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität zu München.
- GÜNTHER, M. (1955): Untersuchungen über das Ertragsvermögen der Hauptholzarten im Bereich verschiedener Standortseinheiten des württembergischen Neckarlandes. In: *Mitt. Ver. Forstl. Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung*, H. 4, S. 5–31.
- HAMMEL, K. u. M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. München.
- HARTMANN, P. (2013): Nutzbare Feldkapazitäten im effektiven Wurzelraum an BZE2-Standorten in Baden-Württemberg. In: *Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, A. B. u. U. (Hrsg.) (2013): Ausgleichs- und Reaktorfunktionen von Waldböden im Stoff- und Wasserkreislauf*, S. 95–102.
- HAUSER, S. (2003): Dynamik hochaufgelöster radialer Schaftveränderungen und des Dickenwachstums bei Buchen (*Fagus sylvatica* L.) der Schwäbischen Alb unter dem Einfluss von Witterung und Bewirtschaftung. Inaugural-Dissertation. Freiburg im Breisgau, Germany.
- HAYWOOD, A. (2002): Growth of advanced European beech trees in the transformation phase in the southern Black Forest. Inaugural-Dissertation. Freiburg im Breisgau, Germany.
- HENHAPPL, G. (1965): Über die Stärkeänderung der peripheren Stammzone von Waldbäumen im Jahresablauf. Dissertation. Freiburg i.Br.
- HERTEL, D., H. CONERS, A. MUHS, F. SCHIPKA u. STROBEL J. (2004): Zur Trockenheitsgrenze der Buche in Mittel- und Ostdeutschland: Eine ökosystemare Transektstudie an Buchen-Altbeständen. In: *Berichte des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt Sonderheft*, H. 2, S. 28–37.
- HIJMANS, R. J., S. E. CAMERON, J. L. PARRA, P. G. JONES u. A. JARVIS (2005): Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. (<http://www.worldclim.org/>). In: *International Journal of Climatology* 25, H. 15, S. 1965–1978.
- HILDEBRAND, E. E., H. SCHACK-KIRCHNER u. P. TRÜBY (2006): Die Beurteilung des Bodens im Gelände.
- HINRICHS T. (2007) *Forstliches Vermehrungsgut: Informationen für die Praxis*. AID-Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft, Bonn.
- HÖLTKEN, A. M., J. BUSCHBOM u. R. KÄTZEL (2012): Die Artintegrität unserer heimischen Eichen *Quercus robur* L., *Q. petraea* (Matt.) und *Q. pubescens* Willd. aus genetischer Sicht. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 183,5/6, S. 100–110.
- HOMOLKA, A.; SCHUELER, S.; BURG, K.; FLUCH, S.; KREMER, A. (2013): Insights into drought adaptation of two European oak species revealed by nucleotide diversity of candidate genes. In: *Tree Genetics & Genomes*, S. 1-14.
- HU, B., J. SIMON u. H. RENNENBERG (2013): Drought and air warming affect the species-specific levels of stress-related foliar metabolites of three oak species on acidic and calcareous soil. In: *Tree Physiology*.
- JAHN, G. (1991): Temperate deciduous forests of Europe. In: Röhrig, E. u. B. Ulrich (Hrsg.) (1991): *Temperate deciduous forests*. Amsterdam, New York, S. 377–492.

- JOOS, M. (12. November 2013): Ergebnisse der Forsteinrichtungsstatistik 2010 - Stimmt die Richtung. Europapark, Rust.
- JUMP, A. S., J. M. HUNT u. J. PEÑUELAS (2006): Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. In: *Global Change Biology* 12,H. 11, S. 2163–2174.
- JÜTTNER, O. (1975): Ertragstafeln für Eichen. In: Schober, R. (Hrsg.) (1975): Ertragstafeln wichtiger Baumarten. bei verschiedener Durchforstung. Frankfurt am Main, S. 12–25.
- KAHLE, H.-P. (2005) : Zur Elastizität des Radialzuwachses in Abhängigkeit von Baumart, Baumalter und Standort. In: Deutscher Verband Forstlicher Versuchsanstalten - Sektion Ertragskunde (Hrsg.): Beiträge zur Jahrestagung 2005, S. 22–32.
- KAHLE, H.-P., J. HANSEN u. H. SPIECKER (2004): A Moving Target: Forest Growth in a Changing Environment - the Role of Long-Term Dynamics. In: Andersson, F., Y. Birot u. R. Päävinen (Hrsg.) (2004): Towards the sustainable use of Europe's forests - forest ecosystem and landscape research. Scientific challenges and opportunities. Joensuu, S. 31–39.
- KÄNDLER, G., M. SCHMIDT u. J. BREIDENBACH (2005): Der Wald in Baden-Württemberg - Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2. Verwaltungseinheit: Land BW, Zuwachs/Nutzung. http://www.fva-bw.de/indexjs.html?http://www.fva-bw.de/monitoring/bui/bwi/bwi2_b.php (Zugriff am 24.07.2014).
- KARIUKI, M. (2002): Height estimation in complete stem analysis using annual radial growth measurements. In: *Forestry* 75,H. 1, S. 63–74.
- KEIL, M., M. BOCK, T. ESCH, A. METZ, S. NIELAND u. A. PFITZNER (2011): CORINE Land Cover. Aktualisierung 2006 für Deutschland.
- KLÄDTKE J. (1997) 25 Jahre Buchen-Lichtwuchsdurchforstung nach Altherr, in DEUTSCHER VERBAND FORSTLICHER VERSUCHSANSTALTEN - SEKTION ERTRAGSKUNDE (Ed) *Berichte zur Jahrestagung*, pp. 248–258.
- DUKLEINSCHMIT, J. R., A. KREMER u. A. ROLOFF (1990): Sind Stieleiche und Traubeneiche zwei getrennte Arten? In: *AFZ/Der Wald* 50,H. 26, S. 1453–1456.
- KOLÁŘ, T., M. RYBNÍČEK u. W. TEGEL (2013): Dendrochronological evidence of cockchafer (*Melolontha* sp.) outbreaks in subfossil tree-trunks from Tovačov (CZ Moravia). In: *Dendrochronologia* 31,H. 1, S. 29–33.
- KÖLLING, C. (2007): Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. In: *AFZ/Der Wald*,H. 23, S. 1242–1245.
- KÖLLING C. u. SCHMIDT O. (2013) Die Lügen der Überlebenden: Wie unsere Urteile über Chancen und Risiken verzerrt werden können, *LWF aktuell* 96, 22–24.
- KÖLLING, C., H. WALENTOWSKI u. H. BORCHERT (2005): Die Buche in Mitteleuropa. Eine Waldbaumart mit grandioser Vergangenheit und sicherer Zukunft. In: *AFZ/Der Wald* 60,H. 13, S. 696–699.
- KÖLLING, C. u. L. ZIMMERMANN (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. In: *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 67,H. 6, S. 259–268.
- KÖNIG, A. O. u. STAUBER T. (2004): Haplotypenbestimmung als Hilfsmittel. Zuordnungsmöglichkeiten von Eichenbeständen zu ihren nacheiszeitlichen Gründerpopulationen bzw. Herkunftsregionen. In: LÖBF NRW (Hrsg.) (2004): Vitalität und genetische Variabilität der Eiche in Nordrhein-Westfalen, S. 30–37.
- KÖNIG, A. O., B. ZIEGENHAGEN, B. VAN DAM, U. M. CSAIKL, E. COART, B. DEGEN, K. BURG, S. G. M. DE VRIES u. R. J. PETIT (2002): Chloroplast DNA variation of oaks in western Central Europe and genetic consequences of human influences. In: *Forest Ecology and Management* 156,1-3, S. 147–166.

- KÖSTLER, J. N., E. BRÜCKNER u. H. BIEBELRIETHER (1968): Die Wurzeln der Waldbäume. Parey.
- KONNERT, M.; CREMER, E.; FUSSI, B. (2014): Genetische Variation wichtiger Waldbaumarten in Bayern. In: *LWF-Wissen* (74), S. 14–21.
- KOZŁOWSKI T. T. u. PALLARDY S. G. (1997) *Growth control in woody plants*. Academic Press, San Diego.
- KOZŁOWSKI, T. T., P. J. KRAMER u. S. G. PALLARDY (1991): The Physiological Ecology of Woody Plants. San Diego.
- KRAFT, G. (1884): Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover.
- KRAHL-URBAN, J. (1959): Die Eichen.
- KRAMER, H. (1982): Kurzfristige Zuwachsreaktionen bei Buche in Abhängigkeit von Witterung und verschiedenen Baummerkmalen. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 153, H. 4, S. 57–67.
- KRAMER, H. u. C. KÄTSCH (1982): Zum jahreszeitlichen Ablauf des sekundären Dickenwachstums im Kalkbuchenwald. In: *Forstarchiv* 53, S. 87–93.
- KREMER, A., J. L. DUPOUEY, J. D. DEANS, J. COTTRELL, U. M. CSAIKL, R. FINKELDEY, S. ESPINEL, J. S. JENSEN, J. KLEINSCHMIT, B. VAN DAM, A. DUCOUSSO, I. FORREST, U. LOPEZ DE HEREDIA, A. J. LOWE, M. TUTKOVA, R. C. MUNRO, S. STEINHOFFI u. V. BADEAU (2002): Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercus petraea* is stable across western European mixed oak stands. In: *Ann. For. Sci.* 59, S. 777–787.
- KRÖNER, H. (1952): Die physiologischen Auswirkungen des Dürresommers 1947 auf Höhen- und Dickenzuwachs unserer Waldbäume.
- LANDESBETRIEB FORST BADEN-WÜRTTEMBERG u. B.-W. MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2014): Richtlinie landesweiter Waldentwicklungstypen.
- LANDMANN, G., M. BECKER, C. DELATOUR, E. DREYER u. J. L. DUPOUEY (1993): Oak dieback in France: historical and recent records, possible causes, current investigations. In: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hrsg.) (1993): Zustand und Gefährdung der Laubwälder. München, S. 45–58.
- LAVARENNE-ALLARY, S. (1965): Recherches sur la croissance des bourgeons de chêne et de quelques espèces ligneuses. In: *Ann. For. Sci.* 22, S. 1–203.
- LEI P. u. BAUHUS J. (2010) Use of near-infrared reflectance spectroscopy to predict species composition in tree fine-root mixtures, *Plant and Soil* 333, 93-103.
- LEIBUNDGUT, H. (1984): Unsere Waldbäume. Frauenfeld, Stuttgart.
- LEUSCHNER, C. (1998): Mechanismen der Konkurrenzüberlegenheit der Rotbuche. In: *Ber. d. Reinh.-Tüxen Ges.*, H. 10, S. 5–18.
- LEUSCHNER, C., K. BACKES, D. HERTEL, F. SCHIPKA, U. SCHMITT, O. TERBORG u. M. RUNGE (2001): Drought responses at leaf, stem and fine root levels of competitive *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. trees in dry and wet years. In: *Forest Ecology and Management* 149, 1-3, S. 33–46.
- LEUSCHNER, C., D. HERTEL, H. CONERS u. BÜTTNER V. (2001): Root competition between beech and oak: a hypothesis. In: *Oecologia* 126, S. 276–284.
- LÉVY, G., M. BECKER u. D. DUHAMEL (1992): A comparison of the ecology of pedunculate and sessile oaks: Radial growth in the centre and northwest of France. In: *Forest Ecology and Management* 55, 1-4, S. 51–63.
- LLORET, F., E. G. KEELING u. A. SALA (2011): Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. In: *Oikos* 120, H. 12, S. 1909–1920.

- LONGMAN, K. u. M. COUTTS (1974): Pyhsiology of the oak tree. In: Morris, M. G. u. F. H. Perring (Hrsg.) (1974): The British oak. Its history and natural history. Faringdon, Berkshire, S. 194–221.
- MÄKINEN, H. u. P. VANNINEN (1999): Effect of sample selection on the environmental signal derived from tree-ring series. In: Forest Ecology and Management 113,H. 1, S. 83–89.
- MAKKONEN-SPIECKER, K. u. F. H. EVERS (1993): Untersuchungen zur Reaktionsweise junger Klonfichten (*Picea abies* (L.) Karst.) auf Trockenstreß und Magnesiummangel. 8 Tabellen. Karlsruhe.
- MALIVA, R. u. T. M. MISSIMER (2012): Arid lands water evaluation and management. Berlin, New York.
- MARTONNE, E. D. (1926): Géographie physique. Aréisme et indice d'aridité. In: Comptes Rendus de L'Acad Sci;H. 182, S. 1395–1398.
- MATISONS, R., D. ELFERTS u. G. BRÜMELIS (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. In: Dendrochronologia 31,0 // 2, S. 129–139.
- McKEE, T. B., N. J. DOESKEN u. J. KLEIST (17-22 January 1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Anaheim, California.
- MEINING, S., K. VON WILPERT, J. SCHÄFFER, P. HARTMANN, J. SCHUMACHER, H. DELB, R. JOHN, R. HUG, HÖLSCHER, ANDREA u. N. AUGUSTIN (2013): Waldzustandsbericht 2013 für Baden-Württemberg. Freiburg.
- MEKO, D. M. (2013): Applied Time Serie Analysis. Notes to the course lessons.
- MENZEL, A. (1997): Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen. Auswertung der Beobachtungen in den internationalen phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten. München.
- MENZEL, A., T. H. SPARKS, N. ESTRELLA, E. KOCH, A. AASA, R. AHAS, K. ALM-KÜBLER, P. BISSOLLI, O. BRASLAVSKÁ, A. BRIEDE, F. CHMIELEWSKI, Z. CREPINSEK, Y. CURNEL, Å. DAHL, C. DEFILA, A. DONNELLY, Y. FILELLA, K. JATCZAK, F. MAGE, A. MESTRE, Ø. NORDLLI, J. PEÑUELAS, P. PIRINEN, V. REMIŠOVÁ, H. SCHEIFINGER, M. STRIZ, A. SUSNIK, A. J. H. VAN VLIET, F.-E. WIELGOLASKI, S. ZACH u. A. ZUST (2006): European phenological response to climate change matches the warming pattern. In: Global Change Biology 12,H. 10, S. 1969–1976.
- MÉRIAN, P. u. F. LEBOURGEOIS (2011): Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: A multi-species analysis. In: Forest Ecology and Management 261,H. 8, S. 1382–1391.
- MÉRIAN, P., J.-C. PIERRAT u. F. LEBOURGEOIS (2013): Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate–growth relationships estimation. In: Dendrochronologia,H. 1., S.58-67.
- METTE, T., T. RÖTZER u. H. PRETZSCH (2011): Ein Dürre-Index für die Forstwirtschaft? FORKAST Projekt "Mortalität der Hauptbaumarten" untersucht die Auswirkung von Dürren auf Bäume und Wälder in Bayern. In: LWF aktuell 18,H. 85, S. 19–20.
- MICHELOT, A., N. BRÉDA, C. DAMESIN u. E. DUFRÉNE (2012): Differing growth responses to climatic variations and soil water deficits of *Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris* in a temperate forest. In: Forest Ecology and Management 265,H. 0, S. 161–171.
- MICHELOT, A., S. SIMARD, C. RATHGEBER, E. DUFRÉNE u. C. DAMESIN (2012): Comparing the intra-annual wood formation of three European species (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea* and *Pinus sylvestris*) as related to leaf phenology and non-structural carbohydrate dynamics. In: Tree Physiology 32,H. 8, S. 1033–1045.
- MICHIELS, H.-G. (2014): Überarbeitung der Standortskundlichen Regionalen Gliederung von Baden-Württemberg. In: standort.wald,H. 48, S. 7–40.
- MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG L. U. u. F. B.-W. A. L. (1980) *Jungbestandpflege in den wichtigsten Betriebszieltypen*, Stuttgart.

- MINISTERIUM FÜR LÄNDLICHEN RAUM, E. L. U. F. B.-W. (Hrsg.) (1993): Hilfstabellen für die Forsteinrichtung. Zusammengestellt für den Gebrauch in der Landesforstverwaltung. Stuttgart.
- MITSCHERLICH, G. (1970): Wald, Wachstum und Umwelt - Erster Band. Eine Einführung in die Ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Frankfurt a.M.
- MÖLDER, I. u. C. LEUSCHNER (2014): European beech grows better and is less drought sensitive in mixed than in pure stands: tree neighbourhood effects on radial increment. In: *Trees* 28,H. 3, S. 777-792.
- MOOSMAYER, H. U. (2002): Langfristige regionale Waldbauplanung in Baden-Württemberg. Grundlagen und Ergebnisse. Stuttgart.
- MOSTELLER, F. u. J. TUKEY (1977): *Data Analysis and Regression: A Second Course in Statistics*.
- MUALEM, Y. (1976): A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. In: *Water Resources Research* 12,H. 3, S. 513-522.
- MUIR, G. u. C. SCHLÖTTERER (2005): Evidence for shared ancestral polymorphism rather than recurrent gene flow at microsatellite loci differentiating two hybridizing oaks (*Quercus* spp.). In: *Molecular Ecology* 14,H. 2, S. 549-561.
- NAKIĆENVIĆ, N., J. ALCAMO, G. DAVIS, B. DE VRIES, J. FENHANN, S. GAFFIN, K. GREGORY, A. GRÜBLER, T. Y. JUNG u. T. KRAM (2000): *Special Report on Emissions Scenarios*.
- NEOPHYTOU, C. (2012): Genetische Differenzierung innerhalb von und zwischen Beständen der Stiel- und Traubeneiche im Oberrheingraben: Erste Ergebnisse eines Interreg-Projekts. In: *Forstarchiv* 83,H. 1, S. 34-40.
- NEOPHYTOU, C. (2014): Bayesian clustering analyses for genetic assignment and study of hybridization in oaks: effects of asymmetric phylogenies and asymmetric sampling schemes. In: *Tree Genetics & Genomes* 10,H. 2, S. 273-285.
- NEOPHYTOU, C. u. H.-G. MICHIELS (2013): Upper Rhine Valley: A migration crossroads of middle European oaks. In: *Forest Ecology and Management* 304,H. 0, S. 89-98.
- NEW, M., D. LISTER, M. HULME u. I. MAKIN (2002): A high-resolution data set of surface climate over global land areas. In: *Climate research* 21,H. 1, S. 1-25.
- NEWBERRY, J. D. (1991): A Note on Carmean's Estimate of Height from Stem Analysis Data. In: *Forest Science* 37,H. 1, S. 368-369.
- NICOLINI, E., B. CHANSON u. F. BONNE (2001): Stem Growth and Epicormic Branch Formation in Understorey Beech Trees (*Fagus sylvatica* L.). In: *Annals of Botany* 87,H. 6, S. 737-750.
- NIINEMETS, Ü. u. F. VALLADARES (2006): Tolerance to shade, drought and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs*. In: *Ecological Monographs* 76,H. 4, S. 521-547.
- NOTHDURFT, A., T. WOLF, A. RINGELER, J. BÖHNER u. J. SABOROWSKI (2012): Spatio-temporal prediction of site index based on forest inventories and climate change scenarios. In: *Forest Ecology and Management* 279,H. 0, S. 97-111.
- OBERDORFER, E. (1992): *Süddeutsche Pflanzengesellschaften. Teil IV: Wälder und Gebüsche, A. Textband*. Stuttgart.
- OTTO, H.-J. (1994): *Waldökologie. 19 Tabellen*. Stuttgart.
- PALLARDY S. G. u. KOZLOWSKI T. T. (2008) *Physiology of woody plants*. Elsevier, Amsterdam, Boston.
- PALMER, W. C. (1965): *Meteorological Drought*. Washington, D.C.

- PECK, A. u. H. MAYER (1996): Einfluß von Bestandesparametern auf die Verdunstung von Wäldern. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 115, S. 1–9.
- PEÑUELAS, J., R. OGAYA, M. BOADA u. A. S. JUMP (2007): Migration, invasion and decline: changes in recruitment and forest structure in a warming-linked shift of European beech forest in Catalonia (NE Spain). In: *Ecography* 30, H. 6, S. 829–837.
- PETIT, R. J., C. BODÉNÈS, A. DUCOUSSO, G. ROUSSEL u. A. KREMER (2004): Hybridization as a mechanism of invasion in oaks. In: *New Phytologist* 161, H. 1, S. 151–164.
- PETIT, R. J., U. M. CSAIKL, S. BORDÁCS, K. BURG, E. COART, J. COTTRELL, B. VAN DAM, J. D. DEANS, S. DUMOLIN-LAPÈGUE, S. FINESCHI, R. FINKELDEY, A. GILLIES, I. GLAZ, P. G. GOICOECHEA, J. S. JENSEN, A. O. KÖNIG, A. J. LOWE, S. F. MADSEN, G. MÁTYÁS, R. C. MUNRO, M. OLALDE, M.-H. PEMONGE, F. POPESCU, D. SLADE, H. TABBENER, D. TAURCHINI, S. G. M. DE VRIES, B. ZIEGENHAGEN u. A. KREMER (2002): Chloroplast DNA variation in European white oaks: Phylogeography and patterns of diversity based on data from over 2600 populations. In: Range wide distribution of chloroplast DNA diversity and pollen deposits in European white oaks: inferences about colonisation routes and management of oak genetic resources 156, 1–3, S. 5–26.
- PETRITAN, A. M., R. S. NUSKE, I. C. PETRITAN u. N. C. TUDOSE (2013): Gap disturbance patterns in an old-growth sessile oak (*Quercus petraea* L.)–European beech (*Fagus sylvatica* L.) forest remnant in the Carpathian Mountains, Romania. In: *Forest Ecology and Management* 308, H. 0, S. 67–75.
- PONTON, S., J. L. DUPOUEY, N. BRÉDA, F. FEUILLAT, C. BODÉNÈS u. E. DREYER (2001): Carbon isotope discrimination and wood anatomy variations in mixed stands of *Quercus robur* and *Quercus petraea*. In: *Plant, Cell & Environment* 24, H. 8, S. 861–868.
- POPA, I., S. LECA, A. CRĂCIUNESCU, C. SIDOR u. O. BADEA (2013): Dendroclimatic Response Variability of *Quercus* species in the Romanian Intensive Forest Monitoring Network. In: *Not Bot Horti Agrobo* 41, H. 1, S. 326–332.
- POPESCU, O., D. PARASCAN u. M. MARCU (1968): Beiträge zur Kenntnis der Dynamik des Radialzuwachses bei der Buche im Laufe der Vegetationsperiode. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 139, S. 190–195.
- PRETZSCH, H. (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Berlin [u.a.].
- PRETZSCH, H., K. BIELAK, J. BLOCK, A. BRUCHWALD, J. DIELER, H.-P. EHRHART, U. KOHNLE, J. NAGEL, H. SPELLMANN, M. ZASADA u. A. ZINGG (2013): Productivity of mixed versus pure stands of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) along an ecological gradient. In: *European Journal of Forest Research* 132, H. 2, S. 1-18 // 263–280.
- PRETZSCH, H., G. SCHÜTZE u. E. UHL (2013): Resistance of European tree species to drought stress in mixed versus pure forests: evidence of stress release by inter-specific facilitation. In: *Plant Biology* 15, H. 3, S. 483–495.
- PRISLAN, P., J. GRIČAR, M. DE LUIS, K. T. SMITH u. K. ČUFAR (2013): Phenological variation in xylem and phloem formation in *Fagus sylvatica* from two contrasting sites. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 180, H. 0, S. 142–151.
- PROFESSUR FÜR WALDBAU u. PROFESSUR FÜR FORSTSCHUTZ & DENDROLOGIE (1993): Mitteleuropäische Waldbaumarten. Artbeschreibung und Ökologie unter besonderer Berücksichtigung der Schweiz. Skript. Zürich.
- PUCHALSKI, T. (1972): *Rebnie w Gospodarstwie Lesnym*. Warszawa.
- PUHLMANN, H. u. K. VON WILPERT (2011): Test und Entwicklung von Pedotransferfunktionen für Wasserretention und hydraulische Leitfähigkeit von Waldböden. In: *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*, H. 12, S. 61–71.

- R CORE TEAM (2013): R: A Language and Environment for Statistical Computing. <http://www.R-project.org/>.
- RAJENDRA, K. C., S. SEIFERT, K. PRINZ, O. GAILING u. R. FINKELDEY (2014): Subtle human impacts on neutral genetic diversity and spatial patterns of genetic variation in European beech (*Fagus sylvatica*). In: *Forest Ecology and Management* 319,H. 0, S. 138–149.
- REICH, P. B., R. O. TESKEY, P. S. JOHNSON u. T. M. HINCKLEY (1980): Periodic Root and Shoot Growth in Oak. In: *Forest Science* 26,H. 4, S. 590–598.
- REIDL, K., R. SUCK, M. BUSHART, W. HERTER, M. KOLTZENBURG, H.-G. MICHIELS u. T. WOLF (2013): Potentielle Natürliche Vegetation von Baden-Württemberg. Ubstadt-Weiher.
- REIF, A., U. BRUCKER, K. RAFFAEL, A. SCHMIEDINGER u. J. BAUHUS (2010): Waldbau und Baumartenwahl in Zeiten des Klimawandels aus Sicht des Naturschutzes. Abschlussbericht eines F+E-Vorhabens im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz FKZ 3508 84 0200. Bonn.
- RENNENBERG, H., W. SEILER, A. MATYSSEK, A. GEßLER u. J. KREUZWIESER (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa? In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 175, S. 10–11.
- RIEMER, T. (14.10.1994): Über die Varianz von Jahrringbreiten: Statistische Methoden für die Auswertung der jährlichen Dickenzuwächse von Bäumen unter sich ändernden Lebensbedingungen. Dissertation. Göttingen.
- RITTERSHOFER, F. (2004): Waldpflege und Waldbau. Für Studium und Praxis ; mit einem Abschnitt über Naturschutz im Wald ; mit 42 Tabellen. Freising.
- ROHNER, B., C. BIGLER, J. WUNDER, P. BRANG u. H. BUGMANN (2012): Fifty years of natural succession in Swiss forest reserves: changes in stand structure and mortality rates of oak and beech. In: *Journal of Vegetation Science* 23,H. 5, S. 892–905.
- ROLOFF, A. (1992): Mögliche Auswirkungen des Treibhauseffektes auf die Konkurrenzsituation in Waldökosystemen. In: *Forstarchiv* 63, S. 4–10.
- ROLOFF, A. (2001): Baumkronen. Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens. Stuttgart.
- ROLOFF, A. (2012): Bäume. Lexikon der praktischen Baumbiologie. s.l.
- ROSE, L., C. LEUSCHNER, B. KÖCKEMANN u. H. BUSCHMANN (2009): Are marginal beech (*Fagus sylvatica* L.) provenances a source for drought tolerant ecotypes? In: *European Journal of Forest Research* 128,H. 4, S. 335–343.
- ROSNER, S. (2014): A new type of vulnerability curve: is there truth in vine? In: *Tree Physiology*. DOI: 10.1093/treephys/tpu080.
- SALA A., WOODRUFF D. R. and MEINZER F. C. (2012) Carbon dynamics in trees: feast or famine?, *Tree Physiology* 32, 764–775.
- SASS, U. G. W. u. D. ECKSTEIN (1995): The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation. In: *Trees* 9,H. 5, S. 247-252.
- SAUTER, U. H., S. M. STÄNGLE, F. BRÜCHERT u. F. L. BREINIG (1. April 2013): Forschung mit dem Computertomografen an der FVA. In: *FVA-einblick* 17,H. 1, S. 20–24.
- SCHARNWEBER, T., M. MANTHEY, C. CRIGEE, A. BAUWE, C. SCHRÖDER u. M. WILMKING (2011): Drought matters - Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. In: *Forest Ecology and Management* 262,H. 6, S. 947–961.
- SCHAEFFER, F., P. SCHACHTSCHABEL u. H.-P. BLUME (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg, Berlin.

- SCHINDLER, D. u. H. MAYER (2007): Forstmeterologische Untersuchungen zur Trockenheit 2003 im Südwesten Deutschlands. In: Allg. Forst- und Jagdztg. 178,2/3, S. 21–37.
- SCHLAG, M. G. (1994): Das europäische "Eichensterben" und seine Ursachen - von einem phytopathologischen Standpunkt aus gesehen. In: Centralblatt für das gesamte Forstwesen 111,H. 4, S. 243–266.
- SCHOBBER, R. (1951a): Zum Einfluss der letzten Dürrejahre auf den Dickenzuwachs. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt 70, S. 204–228.
- SCHOBBER, R. (1951b): Zum jahreszeitlichen Ablauf des sekundären Dickenwachstums. In: Allg. Forst- und Jagdztg. 122, S. 81–96.
- SCHOBBER, R. (1975): Ertragstafeln für Buche, 1967. In: Schober, R. (Hrsg.) (1975): Ertragstafeln wichtiger Baumarten. bei verschiedener Durchforstung. Frankfurt am Main, S. 30–47.
- SCHRAML, C. u. H. RENNEBERG (2000): Sensitivität von Ökotypen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) gegenüber Trockenstress. In: Forstwissenschaftliches Centralblatt vereinigt mit Tharandter forstliches Jahrbuch 119,1-6, S. 51-61.
- SCHRÖDER, J., S. LÖFFLER, A. MICHEL u. R. KÄTZEL (2009): Genetische Differenzierung, Zuwachsentwicklung und Witterungseinfluss in Mischbeständen von Traubeneiche und Kiefer. In: Forst und Holz 64,H. 3, S. 18–24.
- SCHULTE, U. (2004): Vitalitätsentwicklung der Eiche in den Naturwaldzellen Nordrhein-Westfalens. In: LÖBF NRW (Hrsg.) (2004): Vitalität und genetische Variabilität der Eiche in Nordrhein-Westfalen, S. 17–18.
- SCHULZE, E.-D., E. BECK u. K. MÜLLER-HOHENSTEIN (2002): Pflanzenökologie. Heidelberg, Berlin.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1983): Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1993): Jahrringe und Umwelt. Dendroökologie ; [erweitertes Scriptum zur Vorlesung Dendrochronologie am Botanischen Institut der Universität Basel]. Birmensdorf.
- SEIDLING, W., D. ZICHE u. W. BECK (2012): Climate responses and interrelations of stem increment and crown transparency in Norway spruce, Scots pine, and common beech. In: Forest Ecology and Management 284,H. 0, S. 196–204.
- SEIFERT, S.; VORNAM, B.; FINKELDEY, R. (2012): DNA sequence variation and development of SNP markers in beech (*Fagus sylvatica* L.). In: *Eur J Forest Res* 131 (6), S. 1761-1770.
- SEIFERT, S. (2011): Variation of candidate genes related to climate change in European beech (*Fagus sylvatica* L.). Dissertation. Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen. Online verfügbar unter <https://ediss.uni-goettingen.de/handle/11858/00-1735-0000-0006-B154-4>.
- SKOMARKOVA M. V., VAGANOV E. A., MUND M., KNOHL A., LINKE P., BOERNER A. u. SCHULZE E.-D. (2006) Inter-annual and seasonal variability of radial growth, wood density and carbon isotope ratios in tree rings of beech (*Fagus sylvatica*) growing in Germany and Italy, *Trees* 20, 571-586.
- SLOBODA, B. (1971): Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. Dissertationsschrift.
- SOHAR K., LÄÄNELAID A., ECKSTEIN D., HELAMA S. u. JAAGUS J. (2014) Dendroclimatic signals of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in Estonia, *European Journal of Forest Research* 133, 535-549.
- SPÄTH, H. L. (1912): Der Johannistrieb. Ein Beitrag zur Kenntnis der Periodizität und Jahresringbildung sommergrüner Holzgewächse. Berlin.

- SPEKAT, A., W. ENKE u. F. KREIENKAMP (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRESSzenarios B1, A1B und A2.
- SPIECKER, H. (1996): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung von Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. und *Quercus robur* L.).
- STANGLER, D., A. HAMANN, H.-P. KAHLE, DIACONU DIANA u. H. SPIECKER (2014): Growth phenology and productivity of sugar maple and yellow birch under the influence of forest management and environmental stress. In: Association for Tree-ring Research (ATR) (Hrsg.) (2014): Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology (TRACE 2014), abstracts and proceedings. Aviemore, Scotland 6-10 May 2014.
- STRACKEE, J. u. E. JANSMA (1992): The statistical properties of mean sensitivity - a reappraisal. In: *Dendrochronologia*, H. 10, S. 121–135.
- STRASBURGER, E. u. P. SITTE (1991): Lehrbuch der Botanik für Hochschulen. Stuttgart, New York.
- STUDHALTER, R. A. (1956): Early history of crossdating. In: *Tree-Ring Bulletin* 21,1-4, S. 31–35.
- TARDIF, J. C. u. F. CONCIATORI (2006): Influence of climate on tree rings and vessel features in red oak and white oak growing near their northern distribution limit, southwestern Quebec, Canada. In: *Can. J. For. Res.* 36, H. 9, S. 2317–2330.
- TEETOR, P. u. M. K. LOUKIDES (2011): R cookbook. Sebastopol, CA, Beijing.
- THIEL, D., J. KREYLING, S. BACKHAUS, C. BEIERKUHNLEIN, C. BUHK, K. EGEN, G. HUBER, M. KONNERT, L. NAGY u. A. JENTSCH (2014): Different reactions of central and marginal provenances of *Fagus sylvatica* to experimental drought. In: *European Journal of Forest Research* 133, H. 2, S. 247-260.
- THOMAS F. M. (2000) Vertical rooting patterns of mature *Quercus* trees growing on different soil types in northern Germany, *Plant Ecology* 147, 95-103.
- THORNTHWAITE, C. W. (1948): An Approach toward a Rational Classification of Climate. In: *Geographical Review* 38, H. 1, S. 55–94.
- TIMBAL, J. u. G. AUSSENAC (1996): An overview of ecology and silviculture of indigenous oaks in France. In: *Ann. For. Sci.* 53,2-3, S. 649–661.
- TOGNETTI, R., J. JOHNSON u. M. MICHELOZZI (1995): The response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from two Italian populations to drought and recovery. In: *Trees* 9, H. 6, S. 348-354.
- TULIK, M. (2014): The anatomical traits of trunk wood and their relevance to oak (*Quercus robur* L.) vitality. In: *European Journal of Forest Research*, S. 1-11.
- TÜXEN, R. (1956): Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. In: *Angewandte Pflanzensoziologie* 13, S. 5-42.
- TYREE, M. T. u. H. COCHARD (1996): Summer and winter embolism in oak: impact on water relations. In: *Ann. For. Sci.* 53,2-3, S. 173–180.
- URLI, M.; PORTÉ, A. J.; COCHARD, H.; GUENGANT, Y.; BURLETT, R.; DELZON, S. (2013): Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. In: *Tree Physiology* 33 (7), S. 672–683.
- UNESCO (1979): Map of the world distribution of arid regions. Map of the Map at scale 1:25,000,000 with explanatory note. Paris.

- UNIVERSITÄT HAMBURG (2004): Botanik *online*. Das Internethypertextbuch. <http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/>.
- UNTHEIM, H. (1996): Zur Veränderung der Produktivität von Waldstandorten. Untersuchungen zum Höhen- und Volumenwachstum von Fichte (*Picea abies* [L.] Karst.) und Buche [*Fagus sylvatica* L.] auf Standorteinheiten der Ostalb und des Flächenschwarzwaldes. Dissertation, Universität Freiburg.
- VAN DER MAATEN, E. (2012): Climate sensitivity of radial growth in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at different aspects in southwestern Germany. In: *Trees - Structure and Function*, H. 26, S. 777–788.
- VAN DER MAATEN, E. (2013): Thinning prolongs growth duration of European beech (*Fagus sylvatica* L.) across a valley in southwestern Germany. In: *Forest Ecology and Management* 306, H. 0, S. 135–141.
- VAN DER MAATEN-THEUNISSEN, M. u. O. BOURIAUD (2012): Climate–growth relationships at different stem heights in silver fir and Norway spruce. In: *Can. J. For. Res.* 42, H. 5, S. 958–969.
- VAN DER WERF, G. W., U. G. W. SASS-KLAASSEN u. G. M. J. MOHREN (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. Intra-annual analyses of wood formation. In: *Dendrochronologia* 25, H. 2, S. 103–112.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils¹. In: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, H. 5, S. 892–898.
- VANCK, T. u. H. SPIECKER (2004): Rekonstruktion der Kronenentwicklung von Mittelwaldbuchen. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 175, H. 9, S. 182–188.
- VENABLES, W. N. u. B. D. RIPLEY (2002): *Modern applied statistics with S*. New York.
- VILAGROSA, A., E. CHIRINO, J. J. PEGUERO-PINA, T. S. BARIGAH, H. COCHARD u. E. GIL-PELEGRÍN (2012): Xylem Cavitation and Embolism in Plants Living in Water-Limited Ecosystems. In: Aroca, R. (Hrsg.) (2012): *Plant Responses to Drought Stress*, S. 63–109.
- WAGNER, S. (2013): Die Eiche - von der Charakterbaumart zum unkalkulierbaren Risiko? In: Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg und Landesbetrieb Forst Brandenburg (Hg.): *Die Eiche - Chancen und Risiken einer Charakterbaumart im nordostdeutschen Tiefland*. Tagungsband zur gemeinsamen Vortrags- und Exkursionveranstaltung mit dem Brandenburgischen Forstverein am 23. Mai 2013 in Eberswalde. Potsdam: Brandenburgische Unversitätsdruckerei (Eberswalder forstliche Schriftenreihe, 53), S. 7–10.
- WAREING, P. F. (1956): Photoperiodism in woody plants. In: *Plant. Physiol.* 7, S. 191–214.
- WEBER, P., H. BUGMANN, A. R. PLUETT, L. WALTHERT u. A. RIGLING (2013): Drought response and changing mean sensitivity of European beech close to the dry distribution limit. In: *Trees* 27, H. 1, S. 171–181.
- WELLS, N., S. GODDARD u. M. J. HAYES (2004): A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. In: *J. Climate* 17, H. 12, S. 2335–2351.
- WIGLEY, T. M. L., K. R. BRIFFA u. P. D. JONES (1984): On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. In: *J. Climate Appl. Meteor.* 23, H. 2, S. 201–213.
- WILPERT, K. VON (1990): Die Jahrringstruktur der Fichten in Abhängigkeit von Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. Dissertation. Freiburg.
- WORTEMANN, R., S. HERBETTE, T. S. BARIGAH, B. FUMANAL, R. ALÍA, A. DUCOUSSO, D. GOMORY, P. ROECKEL-DREVET, H. COCHARD u. R. ALIA (2011): Genotypic variability and phenotypic plasticity of cavitation

- resistance in *Fagus sylvatica* L. across Europe // Genotypic variability and phenotypic plasticity of cavitation resistance in *Fagus sylvatica* L. across Europe. In: *Tree Physiology* 31,H. 11, S. 1175–1182.
- WÖSTEN, J. H. M., A. LILLY, A. NEMES u. C. LE BAS (1999): Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. In: *Geoderma* 90,3–4, S. 169–185.
- YUE, C., U. KOHNLE, M. HANEWINKEL u. J. KLÄDTKE (2011): Extracting environmentally driven growth trends from diameter increment series based on a multiplicative decomposition model. In: *Canadian Journal of Forest Research* 41,H. 8, S. 1577–1589.
- ZADWORNÝ, M., A. M. JAGODZIŃSKI, P. ŁAKOMY, K. UFNALSKI u. J. OLEKSYN (2014): The silent shareholder in deterioration of oak growth: common planting practices affect the long-term response of oaks to periodic drought. In: *Forest Ecology and Management* 318,H. 0, S. 133–141.
- ZAHNER, R. u. A. R. STAGE (1966): A Procedure for Calculating Daily Moisture Stress and Its Utility in Regressions of Tree Growth on Weather. In: *Ecology* 47,H. 1, S. 64–74.
- ZANG C. (2011) Growth reaction of temperate forest trees to summer drought: –a multispecies tree-ring network approach, Technische Universität München.
- ZANG, C. u. F. BIONDI (2013): Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. In: *Dendrochronologia* 31,H. 1, S. 68–74.
- ZANG, C., C. HARTL-MEIER, C. DITTMAR, A. ROTHE u. A. MENZEL (2014): Patterns of drought tolerance in major European temperate forest trees: climatic drivers and levels of variability. In: *Global Change Biology*, S. n/a.
- ZANG, C., A. ROTHE, W. WEIS u. H. PRETZSCH (2011): Zur Anfälligkeit bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstress-Anfälligkeit wichtiger Waldbaumarten aus Jahrringbreiten. In: *Allg. Forst- und Jagdztg.* 182,5/6, S. 98–112.
- ZEILEIS, A. u. T. HOTHORN (2002): Diagnostic Checking in Regression Relationships. In: *R News*,2/3, S. 7–10.
- Z'GRAGGEN S. (1992): *Dendrohistometrisch-klimatologische Untersuchung an Buchen (Fagus sylvatica L.): Inauguraldissertation*, Basel.
- ZIEGLER, C. (2004): Vitalitätsentwicklung der Eiche auf den nordrhein-westfälischen Dauerbeobachtungsflächen. In: LÖBF NRW (Hrsg.) (2004): Vitalität und genetische Variabilität der Eiche in Nordrhein-Westfalen, S. 11–16.
- ZWEIFEL, R., L. ZIMMERMANN, F. ZEUGIN u. D. M. NEWBERY (2006): Intra-annual radial growth and water relations of trees: implications towards a growth mechanism. In: *Journal of Experimental Botany* 57,H. 6, S. 1445–1459.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiele für die unterschiedliche Beurteilung der Trockenstress-Toleranz von Trauben- und Stieleiche aufgrund von Tabellenwerken und verbalen Beschreibungen zu den Standortansprüchen von Baumarten	27
Tabelle 2: Übersicht der in das Suchrastraster fallenden ausgewählten Ökoserien und Standorteinheiten	55
Tabelle 3: Übersicht der ausgewählten Untersuchungsbestände	56
Tabelle 4: Waldwachstumskundliche Kennzahlen der Untersuchungsbäume	95
Tabelle 5: Mittlerer Radialzuwachs (BHD-Scheiben) und dendrochronologische Kennzahlen der Untersuchungsbäume, getrennt nach Buchen und Eichen.....	99
Tabelle 6: Zusammengefasste Ergebnisse der Hauptkomponentenanalysen für verschiedene Kollektive	117
Tabelle 7: Trockenstresskennzahlen für Buchen und Eichen im Vergleich zwischen PRETZSCH ET AL. (2013) und der hier vorgelegten Untersuchung.....	150

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Buchen- und Eichenanteile in den Bundesländern.....	12
Abbildung 2: Buchen- und Eichenanteile in den Landkreisen von Baden-Württemberg	13
Abbildung 3: Klimahülle von Buche (links) und Traubeneiche (rechts)	16
Abbildung 4: Ökogramme von Traubeneiche (links) und Stieleiche (rechts).....	21
Abbildung 5: Natürliche Verbreitung der Traubeneiche (links) und der Stieleiche (rechts).....	24
Abbildung 6: Höhenwachstumsverlauf von Buchen und Eichen nach den Ertragstafelwerten.	28
Abbildung 7: Visualisierung der Hypothesen H4 (links), H5 (Mitte) und H7 (rechts).....	51
Abbildung 8: Beispiel für schwierig zu erkennende Jahrringgrenzen bei Buche.....	63
Abbildung 9: „Unechte“ Triebbasisnarbe aufgrund von Johannistriebbildung an Eiche	63
Abbildung 10: Schematische Darstellung der engmaschigen Entnahme der Kronenscheiben	65
Abbildung 11: Retentions- oder pF-Kurven für drei verschiedene Bodenarten	68
Abbildung 12: Auswirkung der Trendbereinigung mit unterschiedlichen Splinefunktionen.....	75
Abbildung 13: Messwerte (links) und resultierende Trockenstresskennzahlen (rechts) für zwei Beispielbäume	80
Abbildung 14: Veränderung der Trockenstresskennzahlen bei unterschiedlich langen Referenzzeiträumen	81
Abbildung 15: Vergleich der auf den Referenzzeitraum standardisierten mittleren Jahrringbreiten von Buchen und Eichen vor und nach den Trockenjahren 1976 (links) und 2003 (rechts)	82
Abbildung 16: Trend der Radialzuwachsreihen von Buchen und Eichen an allen Untersuchungs- standorten	85
Abbildung 17: Durchschnittliche Niederschlagssumme und mittlere Monatstemperatur während der Vegetationszeit (April bis Sept.) für alle Untersuchungsstandorte	86
Abbildung 18: Mittlere Volumen-Anteile des Grobbodens (>2mm) pro Standort	87
Abbildung 19: Mittlere Trockenraumdichten pro Standort	88
Abbildung 20: Mittlere Durchwurzelungsintensität pro Standort	89
Abbildung 21: Mittelwerte von pH-Werten (links) und Basensättigung (rechts) im Oberboden der Untersuchungsstandorte.....	90
Abbildung 22: Mittelwerte des Matrixpotenzials (links) und des Wassergehalts (rechts) an den Untersuchungsstandorten.....	91
Abbildung 23: Mittelwert der Varianz der Zeitreihen mit den Tageswerten von Matrixpotenzial (links) und Wassergehalt (rechts).....	92
Abbildung 24: Mittlerer Transpirationsquotient der Untersuchungsstandorte	93
Abbildung 25: Nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum an den Untersuchungsstandorten	94
Abbildung 26: Mittlerer Höhenzuwachs der Untersuchungsbäume pro Standort getrennt nach Buchen und Eichen	96
Abbildung 27: Mittlerer Radialzuwachs der Untersuchungsbäume pro Standort getrennt nach Buchen und Eichen	97

Abbildung 28: Die Witterung der Trockenjahre 1976 und 2003 im Vergleich zum Klima an den Untersuchungsstandorten im Schwarzwald (a, oben) und am Stromberg (b, unten)	101
Abbildung 29: Entwicklung der Niederschlagssumme (a, oben) und der monatlichen Mitteltemperatur (b, unten) in den Untersuchungsregionen.....	103
Abbildung 30: Verlauf der mittleren Matrixpotenzialwerte am Untersuchungsstandort Attental in den Trockenjahren 1976 und 2003	104
Abbildung 31: Verlauf der mittleren Matrixpotenzialwerte am Untersuchungsstandort Attental in den Trockenjahren 1976 (a: oben) und 2003 (b: unten) und den Folgejahren.	105
Abbildung 32: Verlauf der REW-Werte (relatives pflanzenverfügbares Wasser) am Untersuchungsstandort Attental in den Trockenjahren 1976 und 2003.	106
Abbildung 33: Artzugehörigkeit der Eichen an den Untersuchungsstandorten im Vergleich zu zwei Standorten die im Rahmen des QREG-Projektes untersucht wurden	107
Abbildung 34: Karte zur Darstellung der eiszeitlichen Refugialgebiete der Untersuchungsbestände sowie aller im Rahmen des QREG-Projekts untersuchten Eichenbestände.....	107
Abbildung 35: Mittlere jährliche Höhenzuwächse von Buche (Bu) und Eiche (Ei) um die Trockenjahre 1976 (a, oben) und 2003 (b, unten)	109
Abbildung 36: Höhenwachstumsgang der Einzelbäume am Standort Leonbronn (Nordhang – Stromberg), links (a) die Buchen, rechts (b) die Eichen	110
Abbildung 37: Gemessener (schwarz) und einzelbaumweise modellierter (grau) Höhenwachstumsgang der untersuchten Buchen am Standort Leonbronn (Nordhang - Stromberg).....	111
Abbildung 38: Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der mittleren Quotienten aus beobachteten Höhen zu modellierten Höhen von Buche (Bu) und Eiche (Ei).....	112
Abbildung 39: Mittlere Radialzuwachserserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der untersuchten Buchen und Eichen von allen Standorten	113
Abbildung 40: Mittlere Radialzuwachserserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der Buchen und Eichen von den untersuchten Altbestände (a, oben) und von den untersuchten Jungbeständen (b, unten) 113	
Abbildung 41: Mittlere Radialzuwachserserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der Buchen und Eichen aus den Untersuchungsregionen „Westabfall des Schwarzwaldes“ (a, oben) und Stromberg (b, unten)114	
Abbildung 42: Mittlere Radialzuwachserserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) der Buchen und Eichen von den nord(-ost) exponierten Hänge (a, oben) und von den süd(west) exponierten Hängen (b, unten)	115
Abbildung 43: Mittlere Radialzuwachserserien in unterschiedlichen Stammhöhen für die untersuchten Buchen (links) und Eichen (rechts), getrennt nach Alt- (oben) und Jungbeständen (unten)	116
Abbildung 44: Verlauf der mittleren Quotienten der Radialzuwachsindices.....	119
Abbildung 45: Koeffizienten der <i>response functions</i> (rf) für den Standort Spielberg.....	120
Abbildung 46: Korrelationskoeffizienten zwischen den Indexserien der Buchen (a, oben) bzw. Eichen (b, unten) und den täglichen Maximaltemperaturen (obere Teilgrafiken) bzw. der täglichen Niederschlagssumme (untere Teilgrafiken) am Standort Spielberg (SP)	122
Abbildung 47: Korrelationskoeffizienten zwischen den Indexserien der Buchen (a, oben) bzw. Eichen (b, unten) und den täglichen Matrixpotenzialwerten am Standort Spielberg (SP)	123
Abbildung 48: Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen sowie relatives Matrixpotenzial ($\Psi_{Rt/Rc/Rs}$: April-Sept) in den Trockenjahren 1976 (links, a) und 2003 (rechts, b)	124

Abbildungsverzeichnis

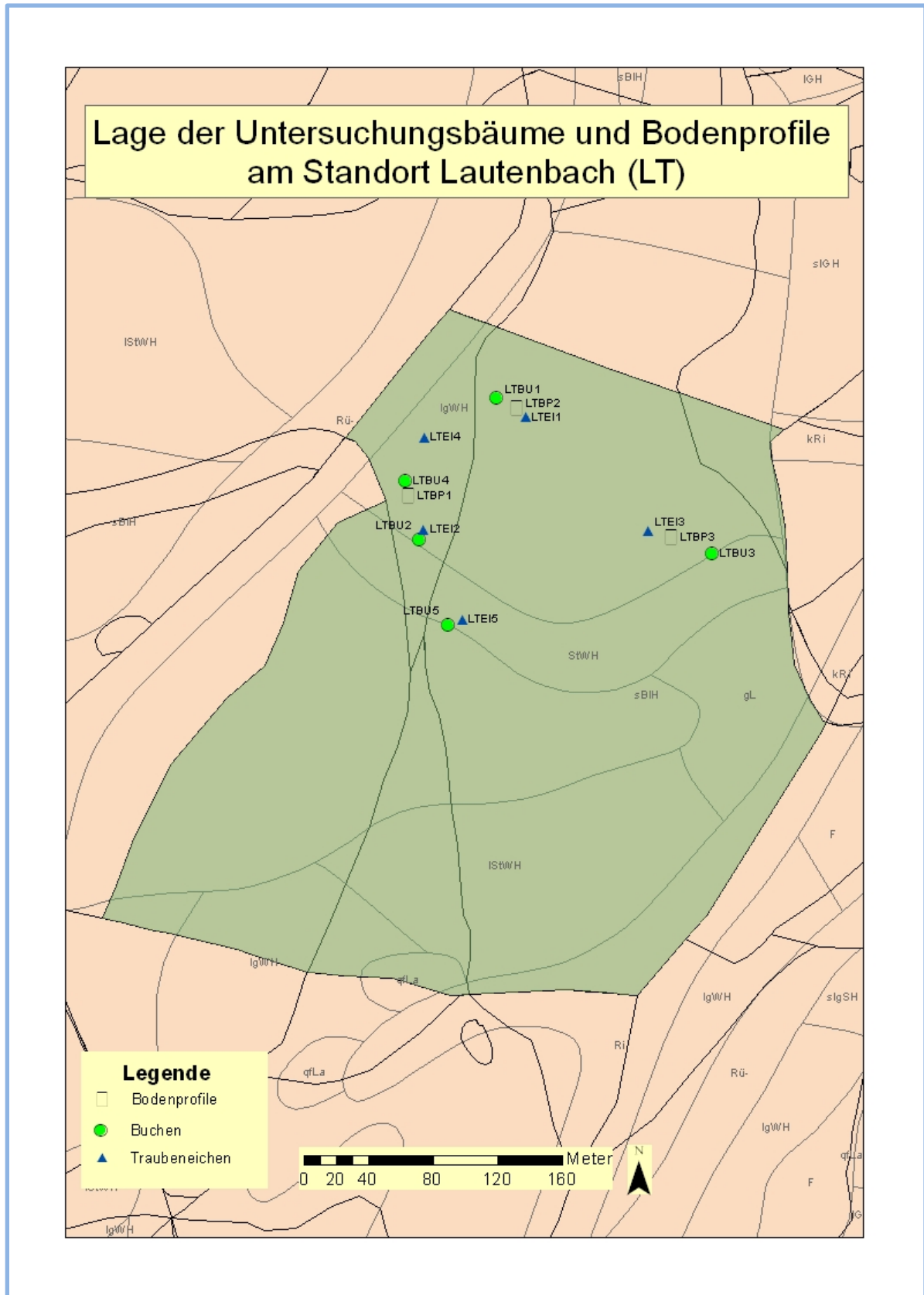
Abbildung 49: Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen sowie relatives Matrixpotenzial ($\Psi_{Rt/Rc/Rs}$: April-Sept) in den Trockenjahren 1976 (links, a und c) und 2003 (rechts, b und d), getrennt für Alt- (oben, a und b) und Jungbestände (unten, c und d)	125
Abbildung 50: Trockenstressreaktion von Buchen (oben) und Eichen (unten) in verschiedenen Stammhöhen in den Trockenjahren 1976 (links, a und c) und 2003 (rechts, b und d).....	127
Abbildung 51: Recovery-Werte der Trockenjahre 1976 und 2003 über dem mittleren absoluten Matrixpotenzial (April-Sept), getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart	128
Abbildung 52: Recovery- (a und b, oben) und Resilienz-Werte (c und d, unten) der Trockenjahre 1976 und 2003 über dem trockenjahr-spezifischen Matrixpotenzial-Index ($ \Psi_{Tj} $), getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart.....	129
Abbildung 53: Bestockungsgrad der STO-BA-Kombinationen	132
Abbildung 54: Boxplots der Trockenstresskennzahlen für die Trockenjahre 1976 und 2003	138
Abbildung 55: Monatliche Niederschlagssumme und mittlere Monatstemperatur in den beiden Untersuchungsregionen: Klimanormale und die Jahre 1979 und 1980.....	146
Abbildung 56: Verlauf der Saugspannungswerten von Juni bis Oktober: 1979 und 2003 im Vergleich	148
Abbildung 57: Vergleich der Trockenstresskennzahlen in „Rein- und Mischbeständen“	151
Abbildung 58: Zusammenhänge zwischen dem Alter der Untersuchungsbäume und den Resistenz- bzw. Recovery-Werten im Trockenjahr 2003.....	153
Abbildung 59: Zusammenhänge zwischen Bestockungsgrad am Untersuchungsbaum und ausgewählten Trockenstresskennzahlen für das Trockenjahr 2003	155
Abbildung 60: Trockenjahr-spezifischer Matrixpotenzial-Index ($ \Psi_{Tj} $) der einzelnen Untersuchungsstandorte in den Trockenjahren (TJ) 1976 und 2003.....	157
Abbildung 61: Relative Häufigkeiten von signifikanten Klima-Witterungsbeziehungen für Buchen und Eichen in Europa.....	160

Verzeichnis der Anhänge

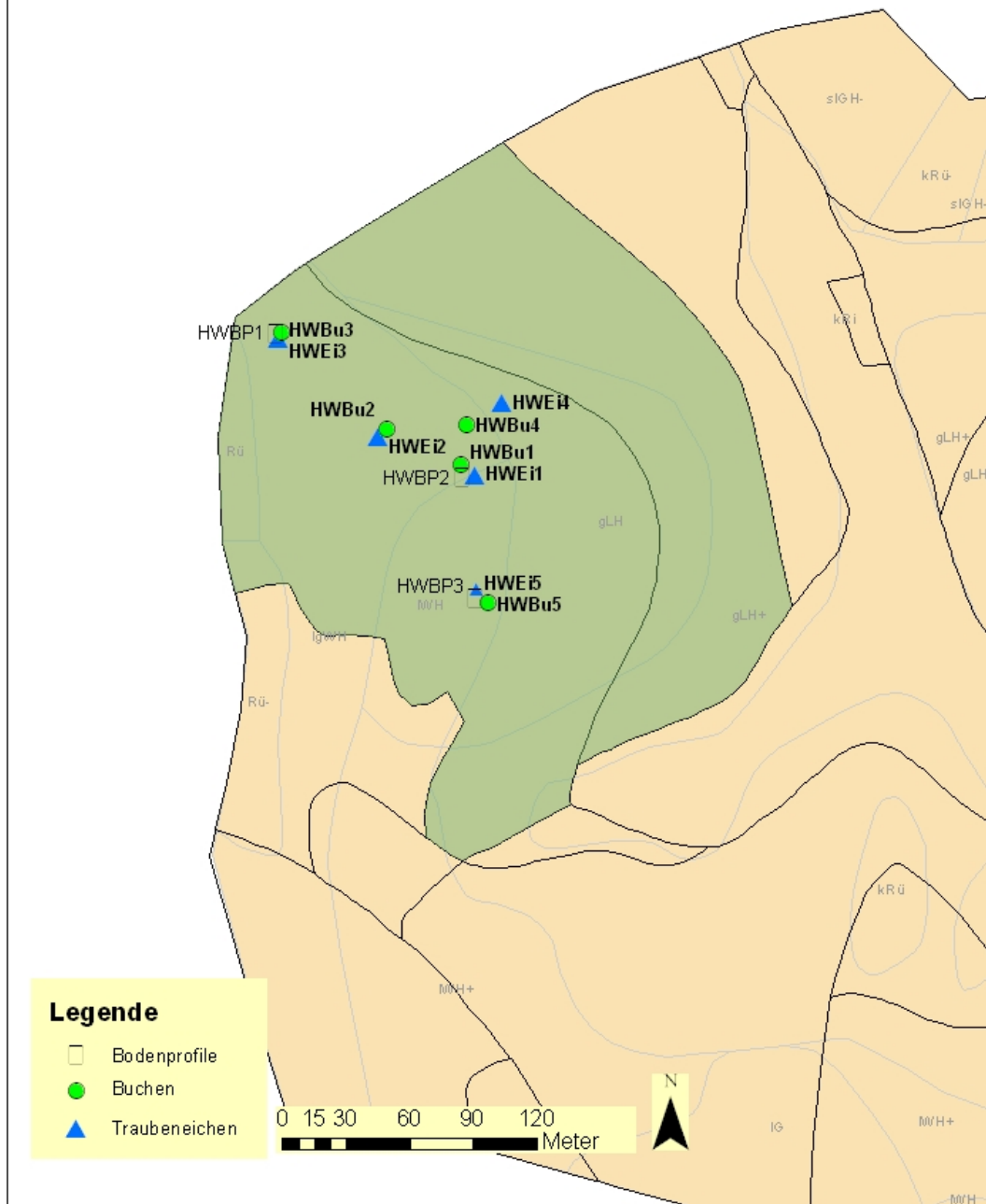
Anhang 1: Kartenskizzen zur Lage der Untersuchungsbäume und Bodenprofile in den Untersuchungsbeständen	203
Anhang 2: Kurzbeschreibung der Bodenprofile	211
Anhang 3: Ablauf der Arbeits- und Berechnungsschritte im bodenphysikalischen Labor	219
Anhang 4: Berechnungsformular zur Bestimmung der Grobboden-Volumenanteile und der Trockenraumdichte des Feinbodens, Bsp. Standort Sulzburg	220
Anhang 5: Radialzuwächse der Einzelbäume, Mittelwert der Standort-Baumart-Kombination und jeweiliges Gesamtmittel	221
Anhang 6: Radialzuwachs der Einzelbäume (Absolutwerte, linke Spalte) und mit 20jährigem Spline trendbereinigte Indexwerte (rechte Spalte).	223
Anhang 7: Klimadiagramme aller Untersuchungsstandorte, basierend auf den DWD-Rasterdaten für den Bezugszeitraum der Klimanormale (1961-1990)	231
Anhang 8: Vergleich des Verlaufs der Matrixpotenzialwerte in den Trockenjahren 1976 und 2003 an allen Untersuchungsstandorten	233
Anhang 9: Vergleich des Verlaufs der Matrixpotenzialwerte in den Trockenjahren 1976 und 2003 und den vier darauffolgenden Jahren an allen Untersuchungsstandorten	235
Anhang 10: Verlauf des Anteils an relativem pflanzenverfügbarem Wasser (REW-Werte) an allen Untersuchungsstandorten in den Trockenjahren 1976 und 2003.	239
Anhang 11: Höhenwachstum der Einzelbäume und Mittelwert der Standort-Baumart-Kombination.	241
Anhang 12: Mittlere Radialzuwachsreihe der Standort-Baumart-Kombination in verschiedenen Stammhöhen	243
Anhang 13: Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen und relatives Matrixpotenzial ($\psi_{Rt/Rc/Rs}$: April-Sept) 1976 (linke Spalte) und 2003 (rechte Spalte) an den einzelnen Untersuchungsstandorten. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Baumarten sind mit rotem Sternchen gekennzeichnet.	246
Anhang 14: Trockenstressreaktion von Buchen (linke Spalte) und Eichen (rechte Spalte) in verschiedenen Stammhöhen an den einzelnen Untersuchungsstandorten.	248
Anhang 15: Trockenstresskennzahlen der Jahre 1976 und 2003 über der mittleren absoluten Matrixpotenzialwerten der Standorte im jeweiligen Trockenjahr, getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart.	252
Anhang 16: Trockenstresskennzahlen der Jahre 1976 und 2003 über dem trockenjahr-spezifischen Matrixpotenzial-Index der Standorte im jeweiligen Trockenjahr, getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart.	253
Anhang 17: Koeffizienten der <i>response functions</i> (rf) für alle Untersuchungsstandorte	254
Anhang 18: Korrelationskoeffizienten zwischen den Indexserien der Buchen (linke Spalte) bzw. Eichen (rechte Spalte) und den täglichen Maximaltemperaturen (obere Teilgrafiken) bzw. der täglichen Niederschlagssumme (untere Teilgrafiken) für alle Standorte	256
Anhang 19: Trockenstresskennzahlen der untersuchten Eichen – Einzelbäume mit unterschiedlichen eiszeitlichen Refugialgebieten im Vergleich.	258
Anhang 20: Verlauf des der Quotienten pro Untersuchungsstandort: Indexserien der Buchen dividiert durch die Indexserien der Eichen.	259

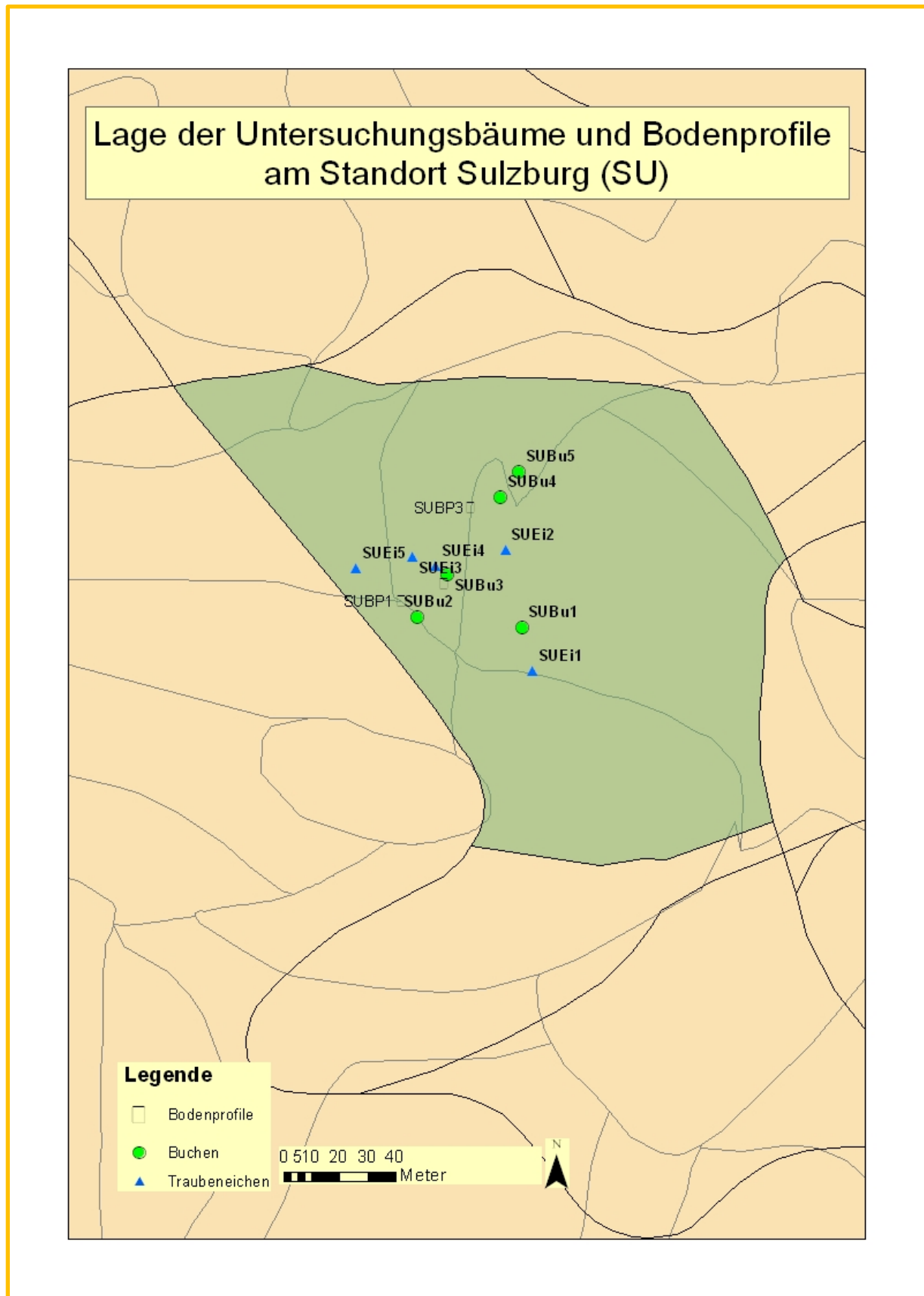
Anhang 21a: Literaturlauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: monatliche Niederschlagssummen und trendbereinigte Radialzuwächse von Buchen	261
Anhang 21b: Literaturlauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: mittlere Monatstemperatur und trendbereinigte Radialzuwächse von Buchen.....	261
Anhang 21c: Literaturlauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: monatliche Niederschlagssummen und trendbereinigte Radialzuwächse von Eichen.....	261
Anhang 21d: Literaturlauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: mittlere Monatstemperatur und trendbereinigte Radialzuwächse von Eichen	261

Anhang 1: Kartenskizzen zur Lage der Untersuchungsbäume und Bodenprofile in den Untersuchungsbeständen
Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

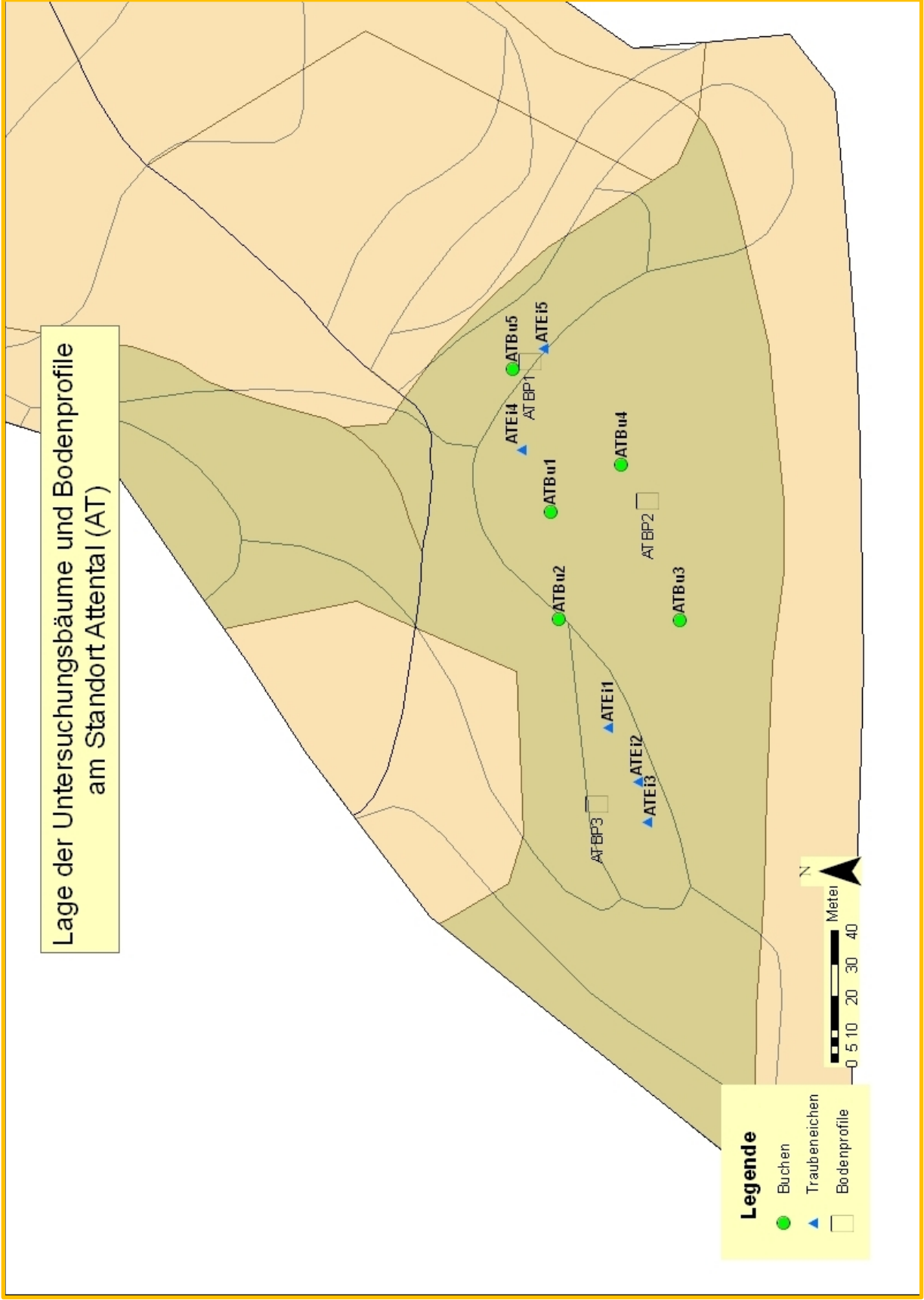


Lage der Untersuchungsbäume und Bodenprofile
am Standort Heuweiler (HW)



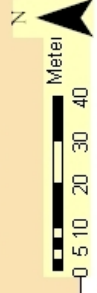


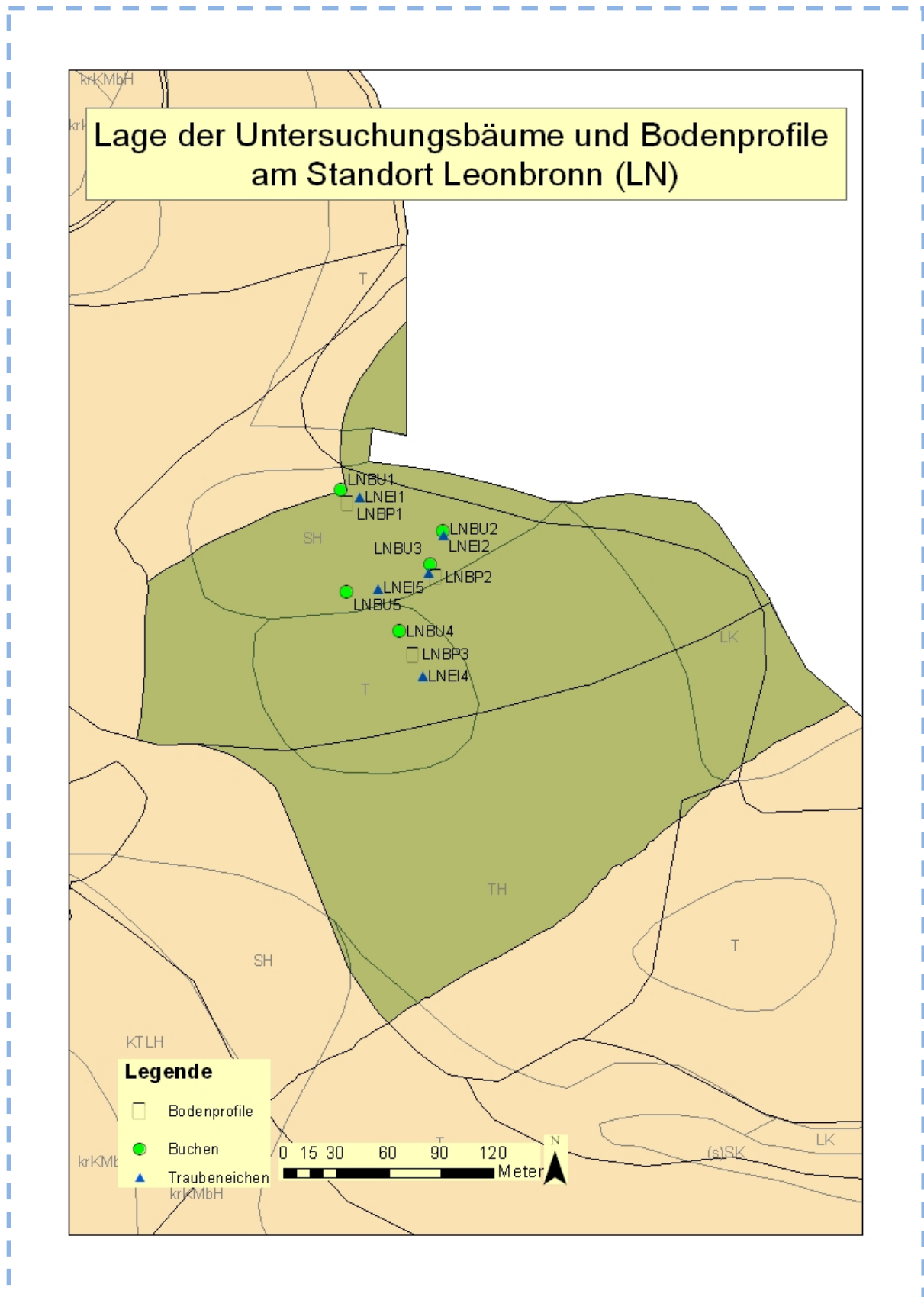
Lage der Untersuchungsbäume und Bodenprofile
am Standort Attental (AT)



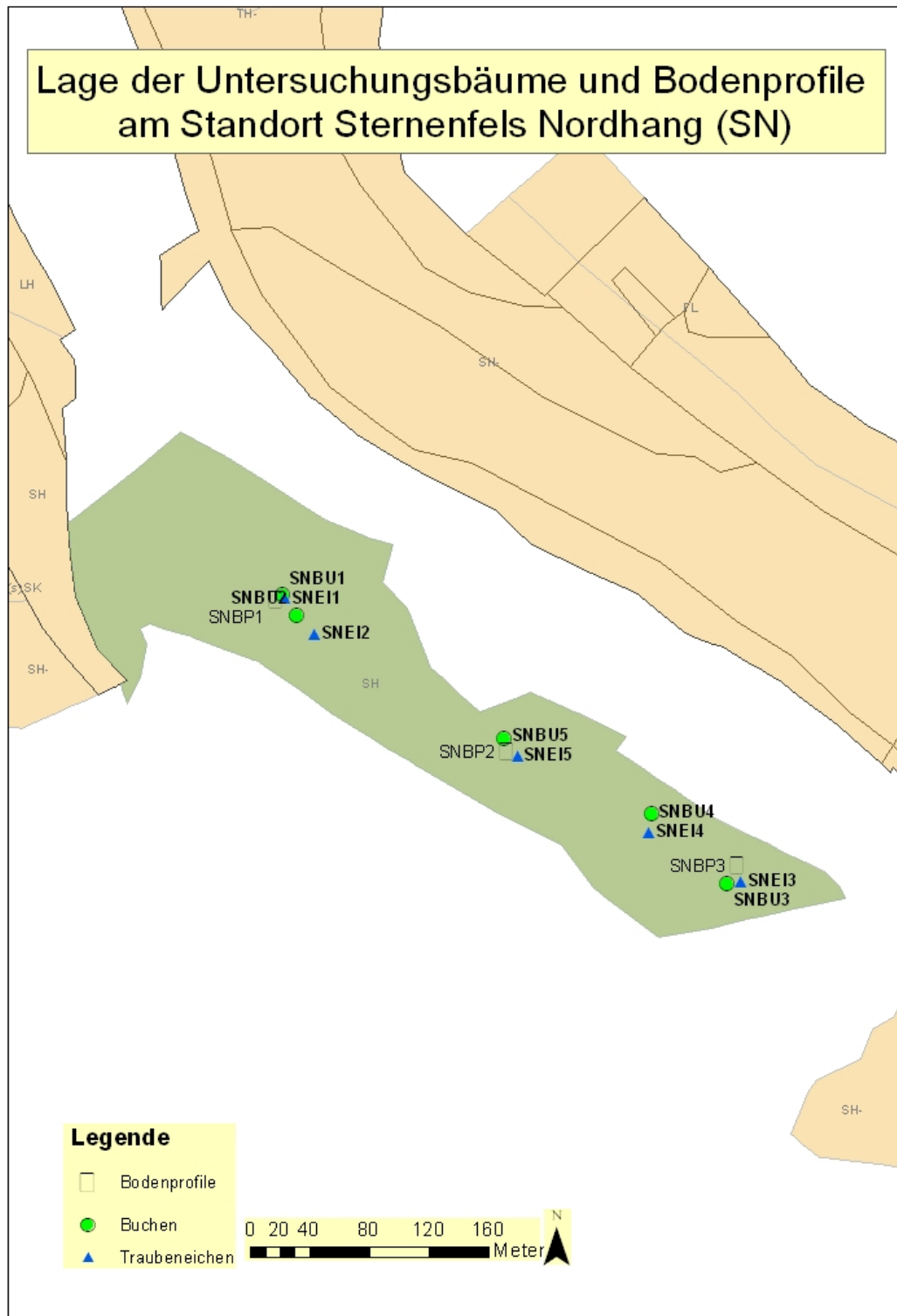
Legende

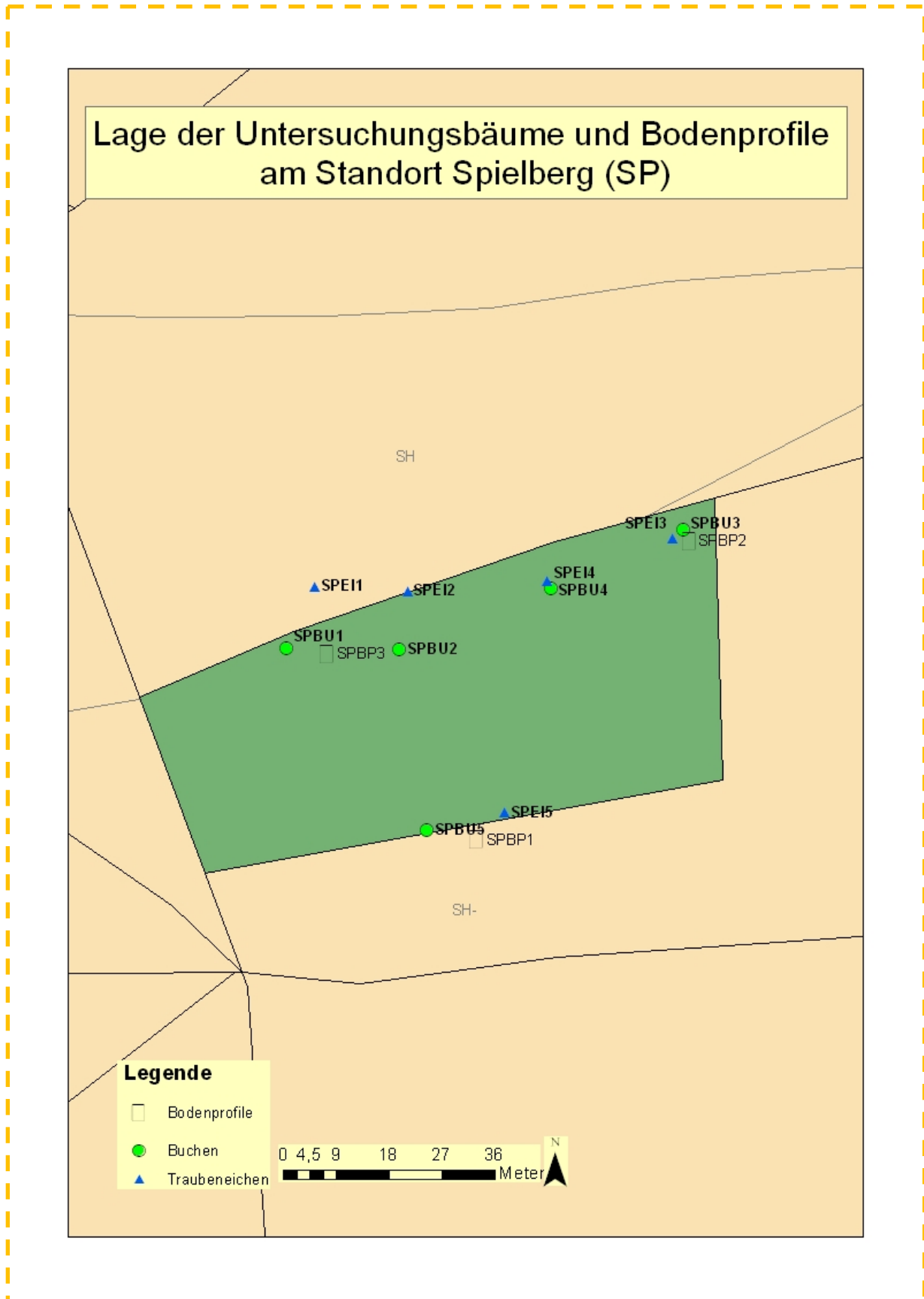
- Buchen
- ▲ Traubeneichen
- Bodenprofile





Lage der Untersuchungsbäume und Bodenprofile am Standort Sternenfels Nordhang (SN)






Lage der Untersuchungsbäume und Bodenprofile am Standort Sternenfels Südhang (SS)




Anhang 2: Kurzbeschreibung der Bodenprofile

Standort: Lautenbach (LT) – Schwarzwald Nordosthang


Profil 1: Parabraunerde – Braunerde (LL-BB)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 2		0 - 20	15,6%	221
	Oh	+ 2 - 0		20 - 40	10,2%	78
	Ah	0 - 11	Sl4	40 - 60	11,4%	28
	Ah-Bv	11 - 20	Sl4			
	Al-Bv	- 48	Lts			
IIBvt	- 72	Ts2				
		-				

Profil 2: Normbraunerde (BBn)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 5 - 3		0 - 20	16,6%	174
	Oh	+ 3 - 0		20 - 40	16,7%	118
	Ah	0 - 11	Sl3	40 - 60	26,3%	29
	Bv	- 45	Ts4			
	Cv+Bv	- 79	Ts3			
		-				

Profil 3: Normbraunerde (BBn)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 5 - 3		0 - 20	72,9%	236
	Oh	+ 3 - 0		20 - 40	23,4%	50
	Ah	0 - 15	Sl3	40 - 60	17,3%	19
	Bv	- 50	Ts3			
	Bv-Cv	- 70	Tl			
		-				

Standort: Heuweiler (HW) – Schwarzwald Nordosthang


Profil 1: Humusbraunerde (BBh)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 3 - 1		0 - 20	10,2%	82
	Of	+ 1 - 0		20 - 40	7,0%	36
	Ah	0 - 18	SI4	40 - 60	19,5%	10
	Ah-Bv	- 40	SI4			
	Bv	- 63	SI3			
-						

Profil 2: Braunerde (BB)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 3 - 1		0 - 20	19,5%	83
	Of	+ 1 - 0		20 - 40	32,6%	26
	Ah	0 - 17	Slu	40 - 60	24,5%	16
	Ah-Bv	- 29	SI3			
	Bv	- 69	SI3			
-						

Profil 3: Humusbraunerde (BBh)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 3 - 1		0 - 20	30,7%	94
	Of	+ 1 - 0		20 - 40	49,8%	38
	Ah	0 - 15	SI4	40 - 60	38,7%	19
	Ah-Bv	- 50	SI3			
	Bv	- 80	SI2			
-						

Standort: Sulzburg (SU) – Schwarzwald Südwesthang


Profil 1: Humusbraunerde (BBh)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 2 – 1		0 - 20	14,1%	139
	Of	+ 1 – 0		20 - 40	18,3%	90
	Ah	0 – 9	Su3	40 - 60	46,1%	52
	Ah-Bv	- 45	Su3			
	Bv	- 73	Sl3			
-						

Profil 2: Braunerde (BB)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 3		0 - 20	38,4%	83
	O+ilC	+ 3 – 0		20 - 40	21,6%	53
	II-Ah	0 – 7	Su3	40 - 60	35,1%	15
	Ah-Bv	- 35	Su3			
	Bv	- 70	Sl3			
-						

Profil 3: Braunerde (BB)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 3		0 - 20	42,9%	131
	O+ilC	+ 3 – 0		20 - 40	47,3%	64
	IIAh	0 – 15	Sl3	40 - 60	42,5%	23
	Ah-Bv	- 36	Sl4			
	Bv	- 70	Sl2			
-						

Standort: Attental (AT) – Schwarzwald Südhang


Profil 1: Braunerde (BB)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 2		0 - 20	14,8%	86
	Of	+ 2 - 0		20 - 40	26,9%	53
	Ah	0 - 21	Su4	40 - 60	29,6%	25
	Bv	- 48	Uls			
	Bv-Cv	- 60	Uls			
-						

Profil 2: Braunerde (BB)


kein Foto verfügbar	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 8 - 4		0 - 20	31,2%	170
	Of	+ 4 - 0		20 - 40	17,7%	58
	Ah	0 - 13	Uls	40 - 60	29,4%	19
	Bv	- 40	Uls			
	Bv-Cv	- 60	Su3			
-						

Profil 3: Braunerde (BB)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 2		0 - 20	17,5%	163
	Of	+ 2 - 0		20 - 40	27,5%	88
	Ah	0 - 17	Su4	40 - 60	45,6%	34
	Bv	- 43	Su4			
	Bv-Cv	- 60	Sl3			
-						

Standort: Leonbronn (LN) – Stromberg Nordhang


Profil 1: schwach podsolige Braunerde (p2BB)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 5 - 3		0 - 20	12,3%	133
	Of	+ 3 - 2		20 - 40	18,9%	50
	Aeh	0 - 4	Slu	40 - 60	34,7%	1
	Ah-Bv	- 29	Su3			
	Bv	- 61	Su3			
	IICv-P	- 123	TI			
-						

Profil 2: Braunerde über Podsol (BB/PP)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 5 - 2		0 - 20	8,8%	100
	Of	+ 2 - 0		20 - 40	26,2%	49
	Ah	0 - 7	Sl3	40 - 60	26,6%	30
	Bv	- 42	Su2			
Bv-P	- 75	Ts4				
-						

Profil 3: Pelosol-Braunerde (DD-BB)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 2		0 - 20	16,8%	133
	Of	+ 2 - 1		20 - 40	27,5%	91
	Oh	+ 1 - 0		40 - 60	17,6%	11
	Ah	0 - 3	Lts			
	Bv	- 29	Lts			
	Bv-P	- 40	Ts2			
IIBv-P	- 70	Tt				
-						

Standort: Sternenfels - Nordhang (SN) – Stromberg Nordhang


Profil 1: Normbraunerde (BBn)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 1		0 - 20	18,5%	95
	Of	+ 1 - 0		20 - 40	29,9%	43
	Ah	0 - 13	Lu	40 - 60	25,9%	35
	AhBv	- 28	Ls2			
	Bv	- 74	Us			
	BvCv	- 100	Us			
	Cv	- 140	Su3			
	IICv	> 140	Tu2			
-						

Profil 2: Braunerde-Pseudogley (BB-SS)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 3,5-0,5		0 - 20	6,9%	76
	Of	+ 0,5 - 0		20 - 40	11,9%	33
	Ah	0 - 13	Uls	40 - 60	35,5%	10
	Sew	- 45	Us			
	IISwd	- 72	Lu			
	Cv	> 72	Su4			
-						

Profil 3: Braunerde-Pseudogley (BB-SS)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 3,5-0,5		0 - 20	2,4%	96
	Of	+ 0,5 - 0		20 - 40	1,0%	38
	Ah	0 - 2	Uls	40 - 60	0,0%	13
	Bv	- 27	Lu			
	Sw	- 38	Lu			
	Swd	- 72	Lt3			
	Cv-Swd	> 72	TI			
	-					

Standort: Spielberg (SP) – Stromberg Südhang


Profil 1: Normbraunerde

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 3 - 1		0 - 20	8,5%	104
	Of	+ 1 - 0		20 - 40	2,8%	30
	Ah	0 - 4	Su2	40 - 60	9,5%	28
	Bv	- 39	Su2			
	IIP-Cv	- 113	TI			
	Cv-Swd	> 113	Tt			
-						

Profil 2: Braunerde-Pseudogley (BB-SS)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 6 - 3		0 - 20	4,3%	198
	Oh	+ 3 - 1		20 - 40	2,6%	39
	Of	+ 1 - 0		40 - 60	7,0%	1
	Ah	0 - 24	Su2			
	BvSw	- 50	Ss			
	CvSwd	- 75	Ts2			
IICv	> 75	Ts2				
-						

Profil 3: Pseudogley-Braunerde (SS-BB)


	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 3 - 1		0 - 20	2,2%	116
	Of	+ 1 - 0		20 - 40	7,3%	13
	Ah	0 - 21	SI2	40 - 60	5,9%	5
	BvSw	- 41	SI3			
	CvSwd	- 64	Ts2			
	-					

Standort: Sternenfels - Südhang (SS) – Stromberg Südhang


Profil 1: Normbraunerde (nBB)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 3		0 - 20	21,6%	140
	Of	+ 3 - 2		20 - 40	27,5%	70
	Oh	+ 2 - 0		40 - 60	19,6%	24
	Ah	0 - 4	Su4			
	Bv	- 31	Su4			
	BvSw	- 68	Su3			
Cv	> 68	Su2				
	-					

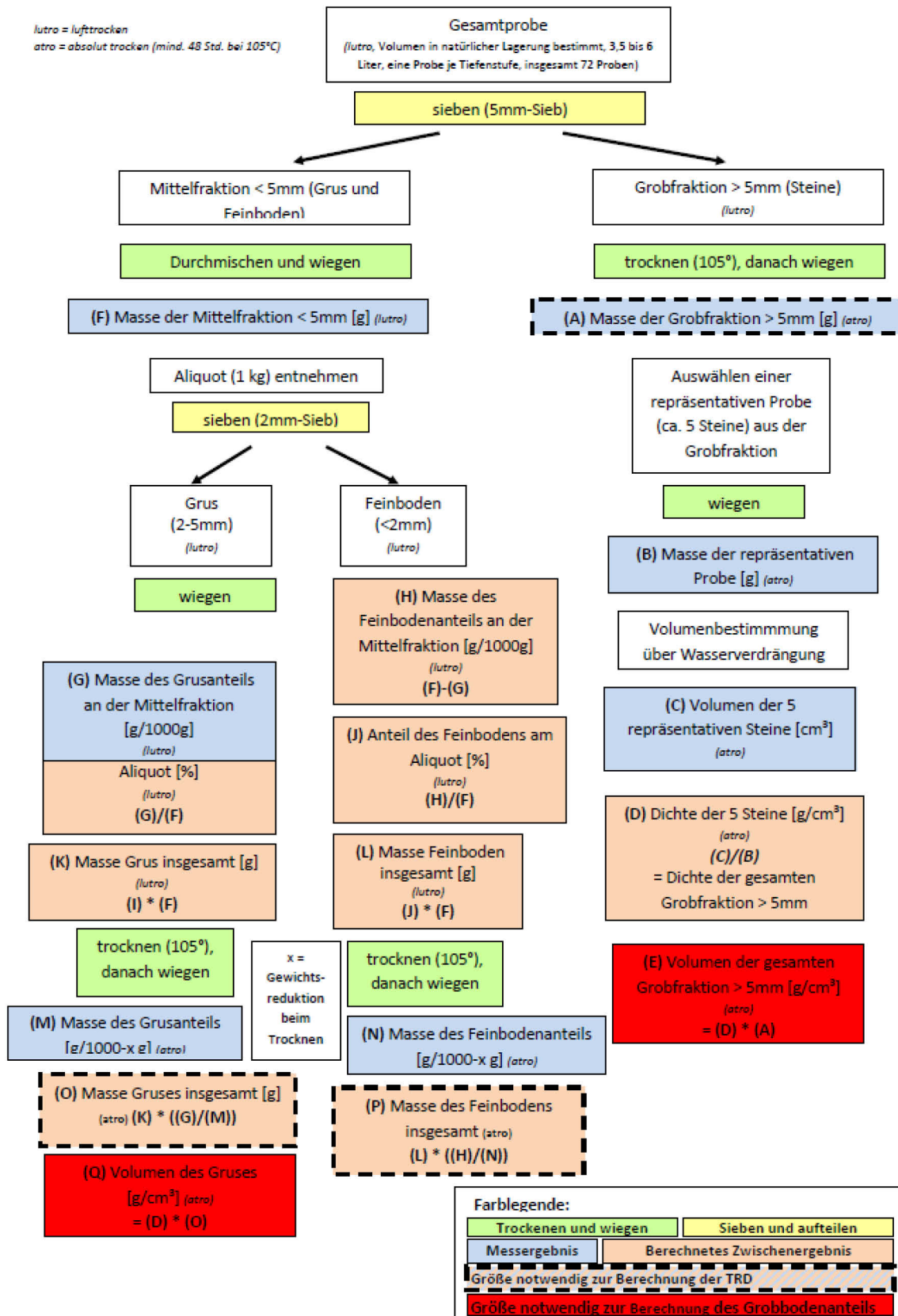
Profil 2: Normbraunerde (nBB)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 4 - 3		0 - 20	10,7%	166
	Of	+ 3 - 2		20 - 40	17,4%	96
	Oh	+ 2 - 0		40 - 60	36,3%	56
	Ah	0 - 4	Us			
	Bv	- 24	Us			
	BvSw	- 102	Su3			
Cv	> 102	Ls3				
	-					

Profil 3: stark podsolierte Braunerde (p4BB)

	Genetische Bodenhorizonte			Tiefenstufen		
	Horizont	Tiefe (cm)	Bodenart	Tiefe (cm)	Grobboden-Volumenanteil (> 2 mm)	Durchwurzelungsdichte (Anzahl/dm ²)
	L	+ 6 - 4		0 - 20	2,4%	208
	Of	+ 4 - 3		20 - 40	4,9%	86
	Oh	+ 3 - 0		40 - 60	7,0%	40
	Ahe	0 - 4	Uls			
	Bhs	- 10	Us			
	Bv	- 37	Us			
	BvSw	- 109	Us			
	SwCv	- 144	Su3			
	-					

Anhang 3: Ablauf der Arbeits- und Berechnungsschritte im bodenphysikalischen Labor



Anhang 4: Berechnungsformular zur Bestimmung der Grobboden-Volumenanteile und der Trockenraumdichte des Feinbodens, Bsp. Standort Sulzburg

Sulzburg			lutro							
			nach Sieben mit 5 mm-Sieb	nach Sieben mit 5 mm-Sieb	Kontrolle	nach Sieben von 1 kg im 2 mm-Sieb	Berechnung	nach Sieben von 1 kg im 2 mm-Sieb	Berechnung	Kontrolle
Tiefenstufe	entnommene Liter	Masse Grobfraction (Steine) (>5mm)	Masse Mittelfraction (<5mm)	natürliche Lagerungsdichte	Masse Grusanteil (2-5mm)	Anteil Grus am Aliquot	Masse Feinboden (<2mm)	Anteil Feinboden am Aliquot	Verluste durch Absieben?	
	[dm³]	[g]	[g]	[g/dm³]	[g von 1000g]	[%]	[g von 1000g]	[%]	[g von 1000g]	
Spalte	B	C	D	E	Fa(D+E)C	G	HxG/K	I	JaIK	KeG/H
SUBP1	0-20cm	5,0	1524	5884	1482	379	38,0%	618	62,0%	997
SUBP1	20-40cm	3,5	1398	5495	1969	175	17,6%	821	82,4%	996
SUBP1	40-60cm	5,0	5265	6375	2328	273	27,4%	724	72,6%	997
SUBP2	0-20cm	7,2	6528	8379	2070	301	30,3%	694	69,7%	995
SUBP2	20-40cm	6,0	3084	5907	1499	247	24,8%	750	75,2%	997
SUBP2	40-60cm	6,7	5682	5025	1598	238	23,9%	759	76,1%	997
SUBP3	0-20cm	6,5	6940	3913	1670	287	28,8%	710	71,2%	997
SUBP3	20-40cm	4,1	4363	3429	1900	264	26,5%	733	73,5%	997
SUBP3	40-60cm	5,0	4898	3873	1754	346	34,7%	651	65,3%	997

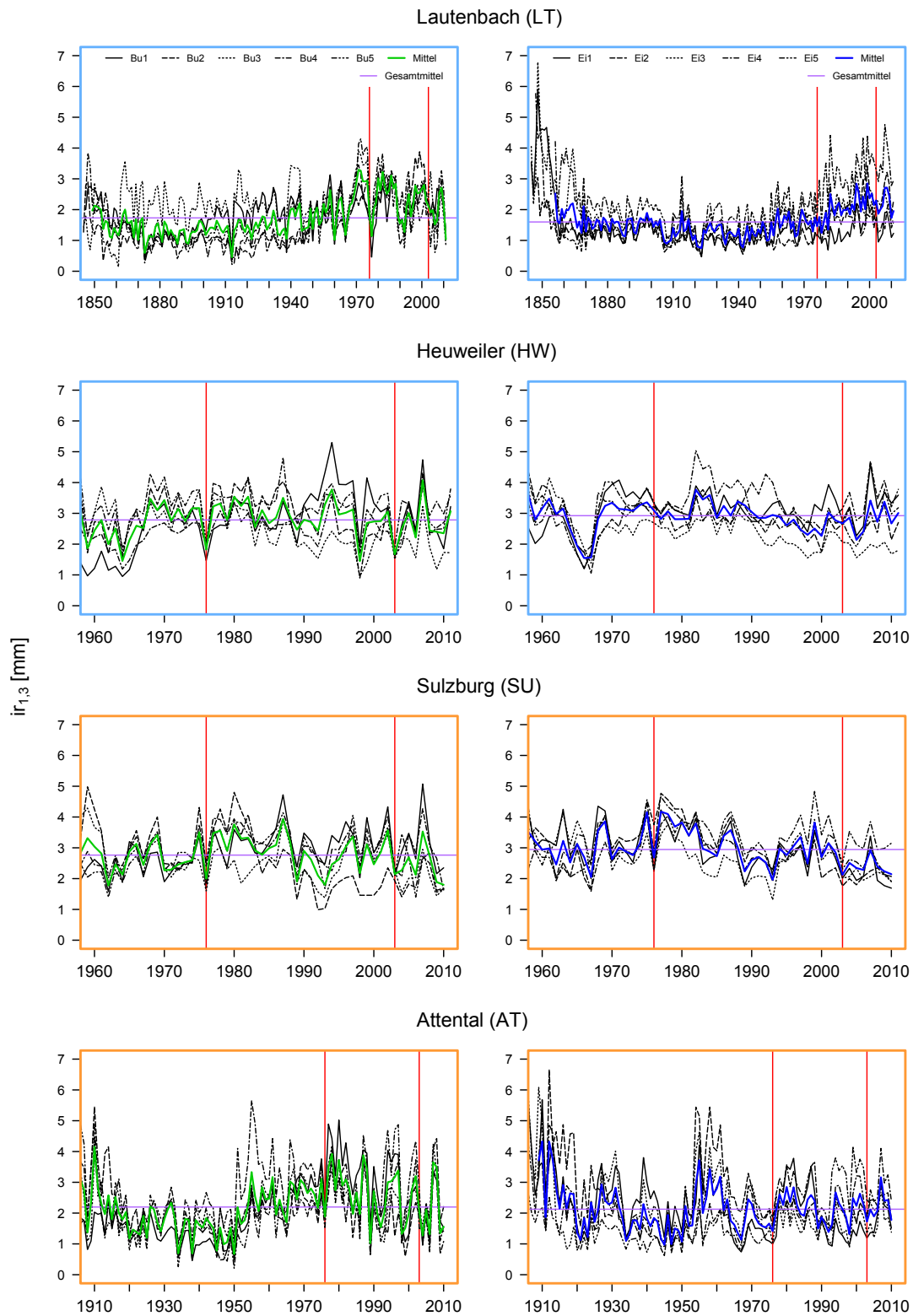
atro						
nach Trocknen bei 105° C	nach Auswahl von 5 getrockneten Steinen	nach Trocknen bei 105° C	Berechnung	nach Trocknen bei 105° C	Berechnung	nach Wasserverdrängung der 5 Steine
Masse Grobfraction (<5mm)	Masse der 5 repräsentativen Steine	Masse Grusanteil (2-5mm)	Masse Grus insgesamt	Masse des Feinbodens (< 2mm)	Masse Feinboden insgesamt	Volumen der 5 repräsentativen Steine
[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[ml]
L	M	N	Oe(N)G'E'H	P	Qe(P)E'J	R
1514,5	112,4	374,7	2211,4	606,8	3581,2	42
1392,0	134,7	172,9	953,9	810,9	4473,8	55
5231,6	372,4	270,7	1730,9	714,4	4568,0	158
6493,7	226,0	297,1	2501,9	682,3	5745,7	92
3069,5	307,2	245,0	1451,6	739,6	4382,0	120
5658,1	562,1	235,7	1188,0	749,3	3776,6	224
6911,5	464,4	283,7	1113,5	696,5	2733,6	180
4345,1	363,4	261,1	898,0	722,8	2485,9	153
4876,2	373,5	342,9	1332,0	642,9	2497,4	152

Berechnung	Berechnung	Berechnung	Grobboden-volumennanteil (> 2mm)	Trocken-raumdichte, insgesamt	Masse Feinboden atro	Trocken-raumdichte Feinboden
Volumen der 5 Steine	Dichte der Steine	Volumen Steine + Grus	TRD, insgesamt	bezogen auf Gesamtproben-volumen	TRD, Feinboden	
[l]	[g/l]	[l]	[%]	[g/cm³]	[g]	[g/cm³]
SeR/1000	TaM/S	Ue(L+N)/T	VaU/C	We(L+H+O)/(C*1000)	Xa(P)PHN'E	YaXl(l.V)C*1000
0,042	2675,7	0,7	14%	1,46	3637,71	0,847
0,055	2449,1	0,6	18%	1,95	4529,27	1,583
0,158	2357,0	2,3	47%	2,31	4623,19	1,734
0,092	2456,5	2,8	38%	2,05	5837,24	1,316
0,120	2560,0	1,3	22%	1,48	4437,15	0,943
0,224	2509,4	2,3	35%	1,59	3822,57	0,878
0,180	2580,0	2,8	43%	1,66	2780,46	0,749
0,153	2375,2	1,9	47%	1,89	2519,04	1,166
0,152	2457,2	2,1	42%	1,74	2525,82	0,878

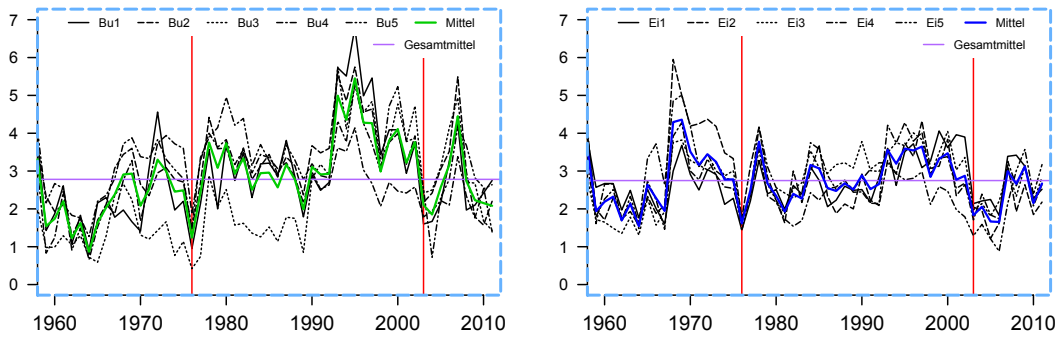
Anhang

Anhang 5: Radialzuwächse der Einzelbäume, Mittelwert der Standort-Baumart-Kombination und jeweiliges Gesamtmittel

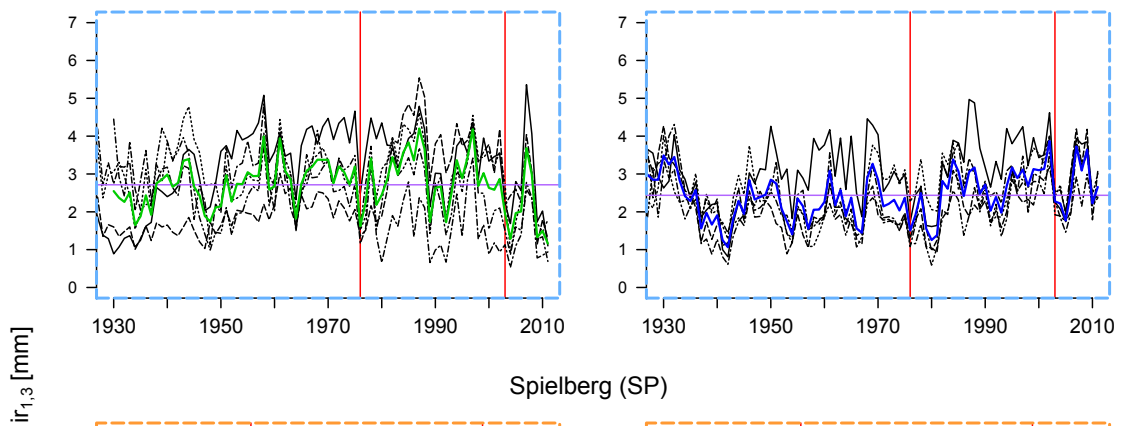
Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.



Leonbronn (LN)

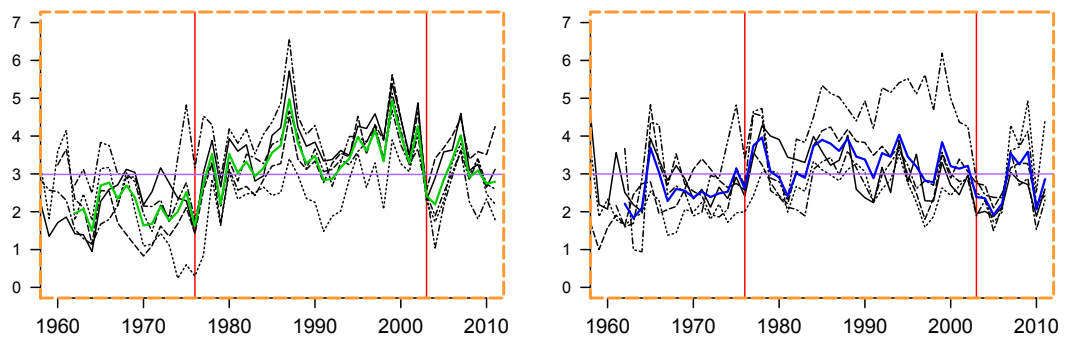


Sternenfels-Nordhang (SN)

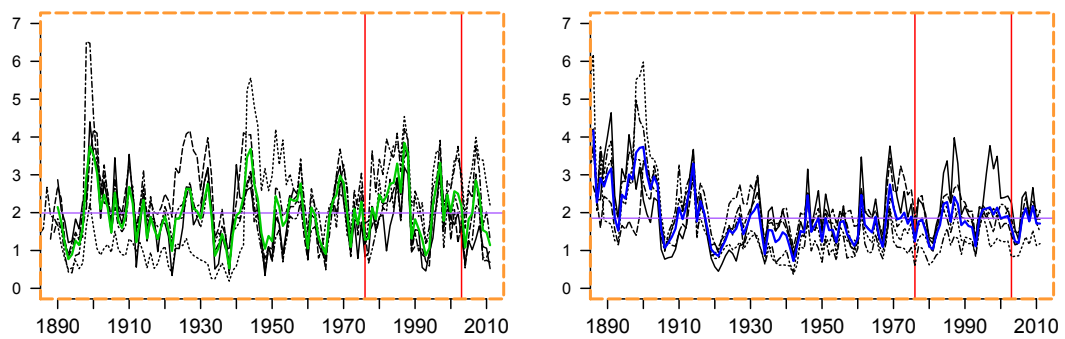


$ir_{1,3}$ [mm]

Spielberg (SP)

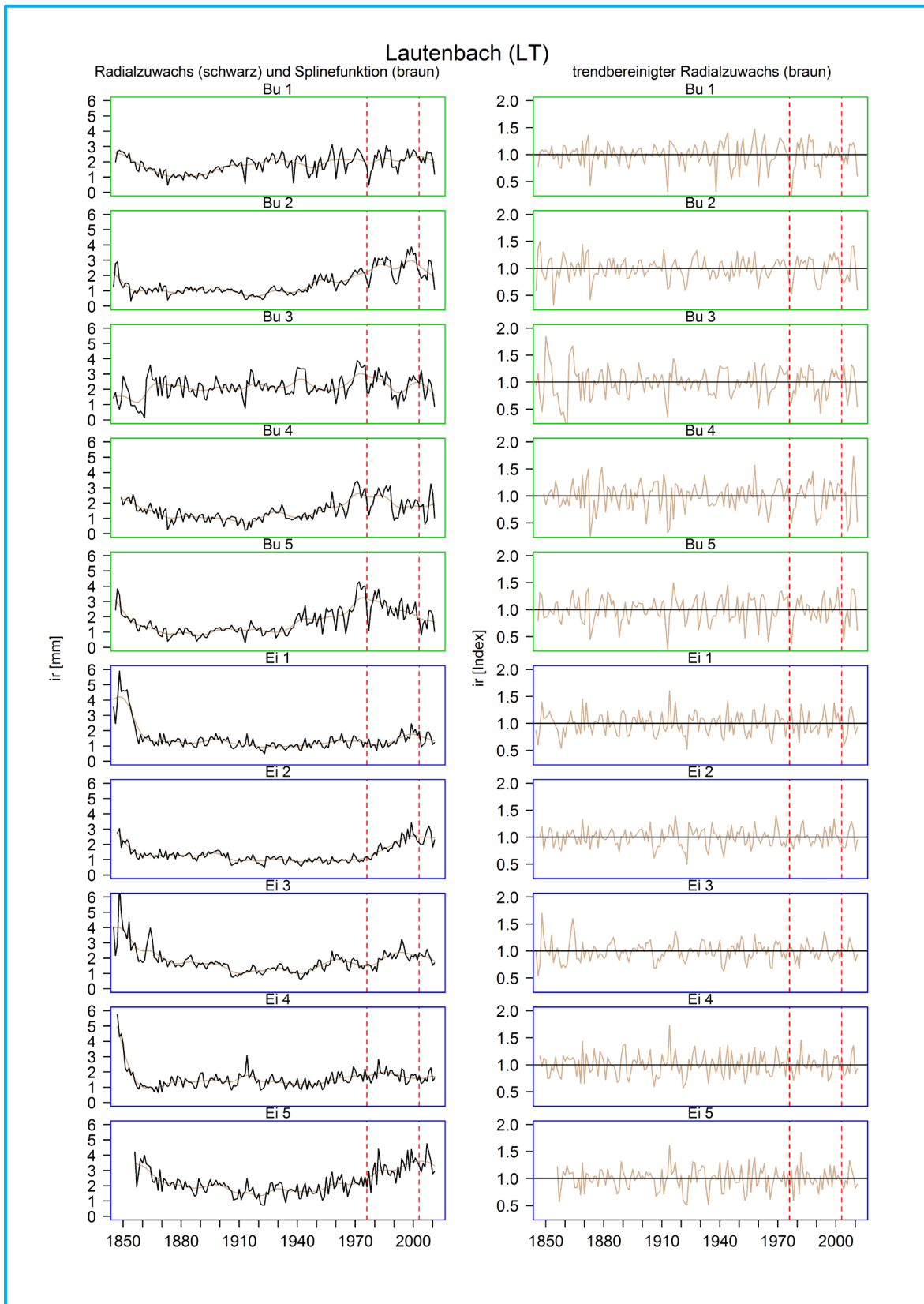


Sternenfels-Südhang (SS)

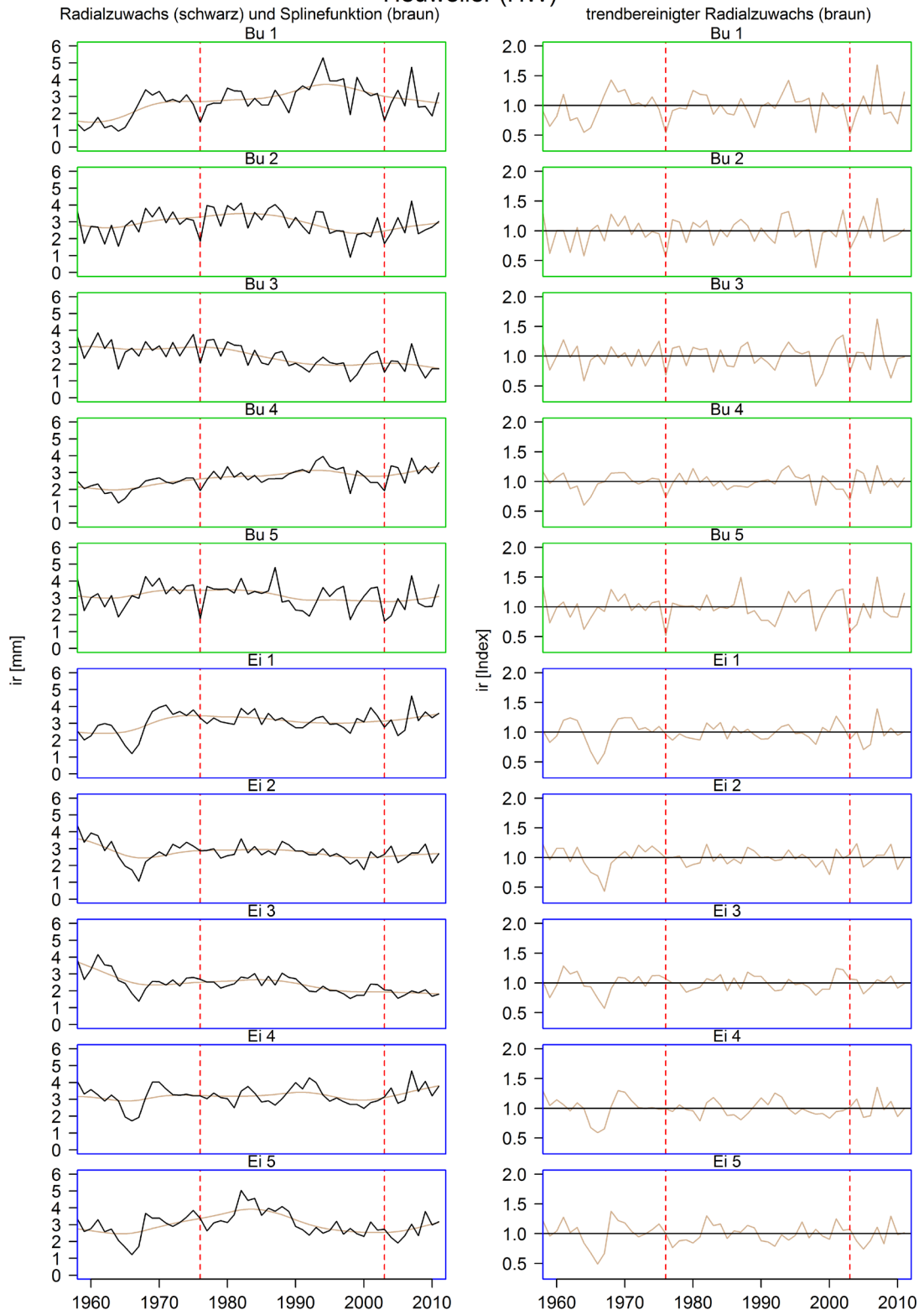


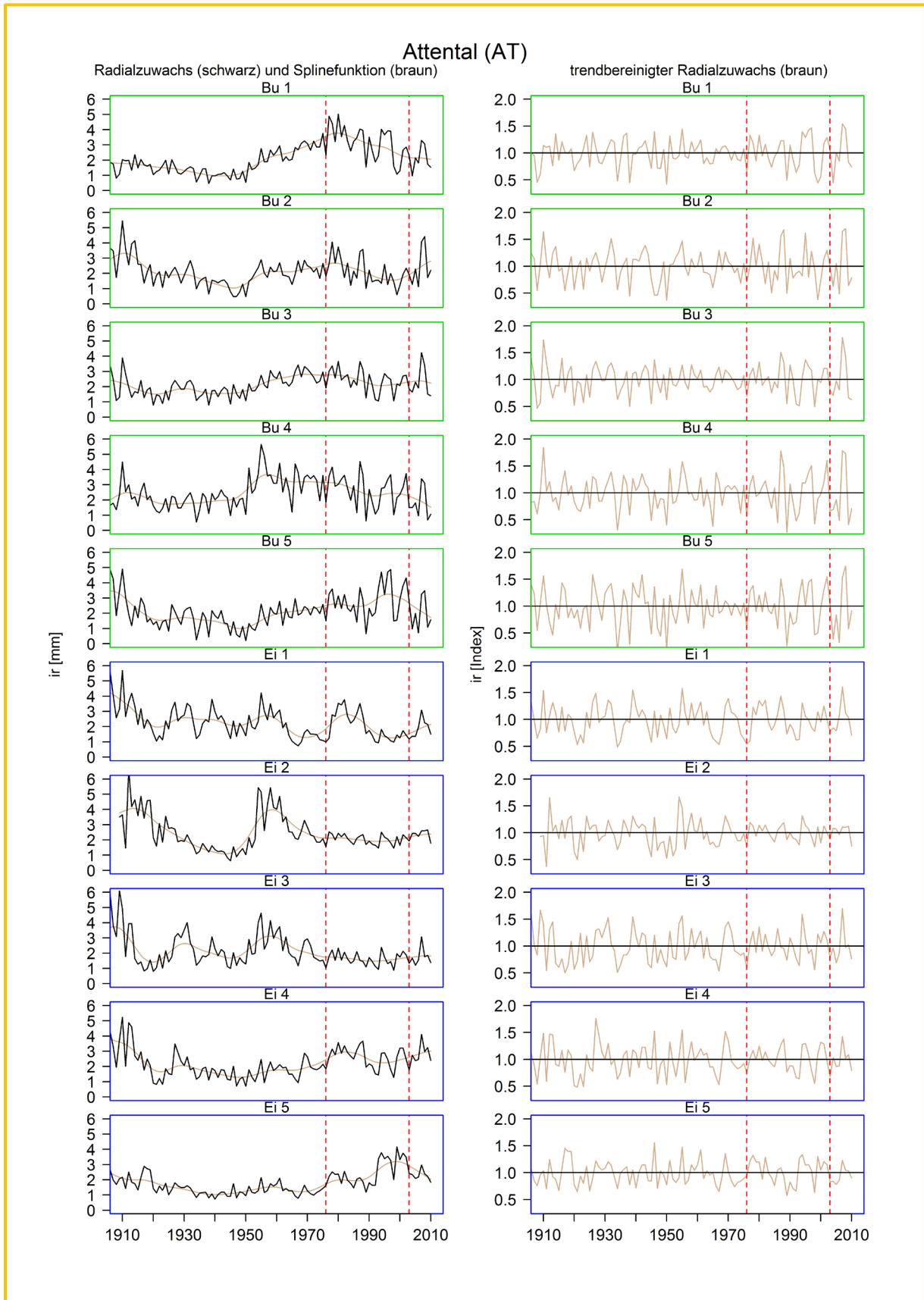
Anhang 6: Radialzuwachs der Einzelbäume (Absolutwerte, linke Spalte) und mit 20jährigem Spline trendbereinigte Indexwerte (rechte Spalte).

Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind mit vertikalen roten Linien gekennzeichnet. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

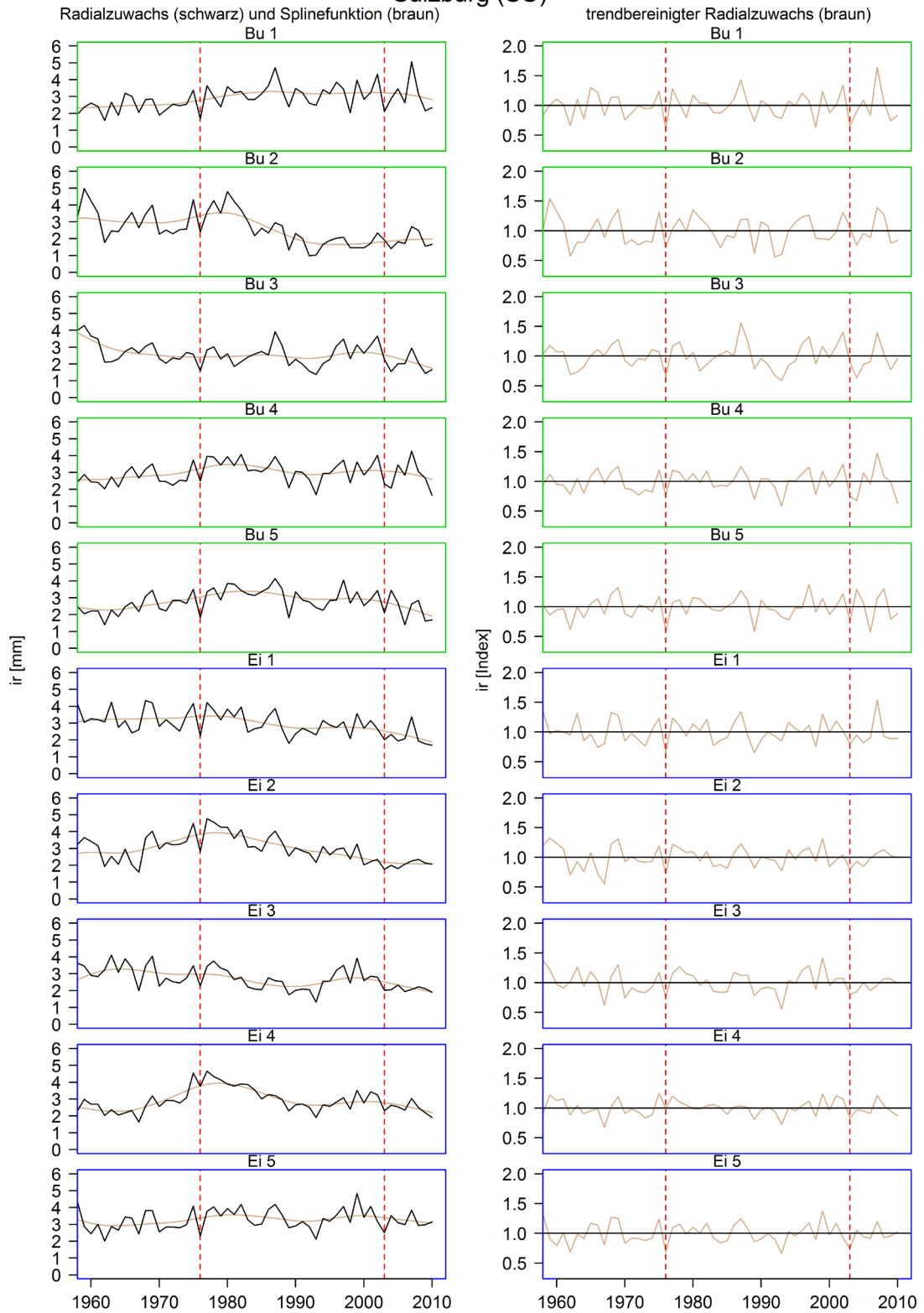


Heuweiler (HW)

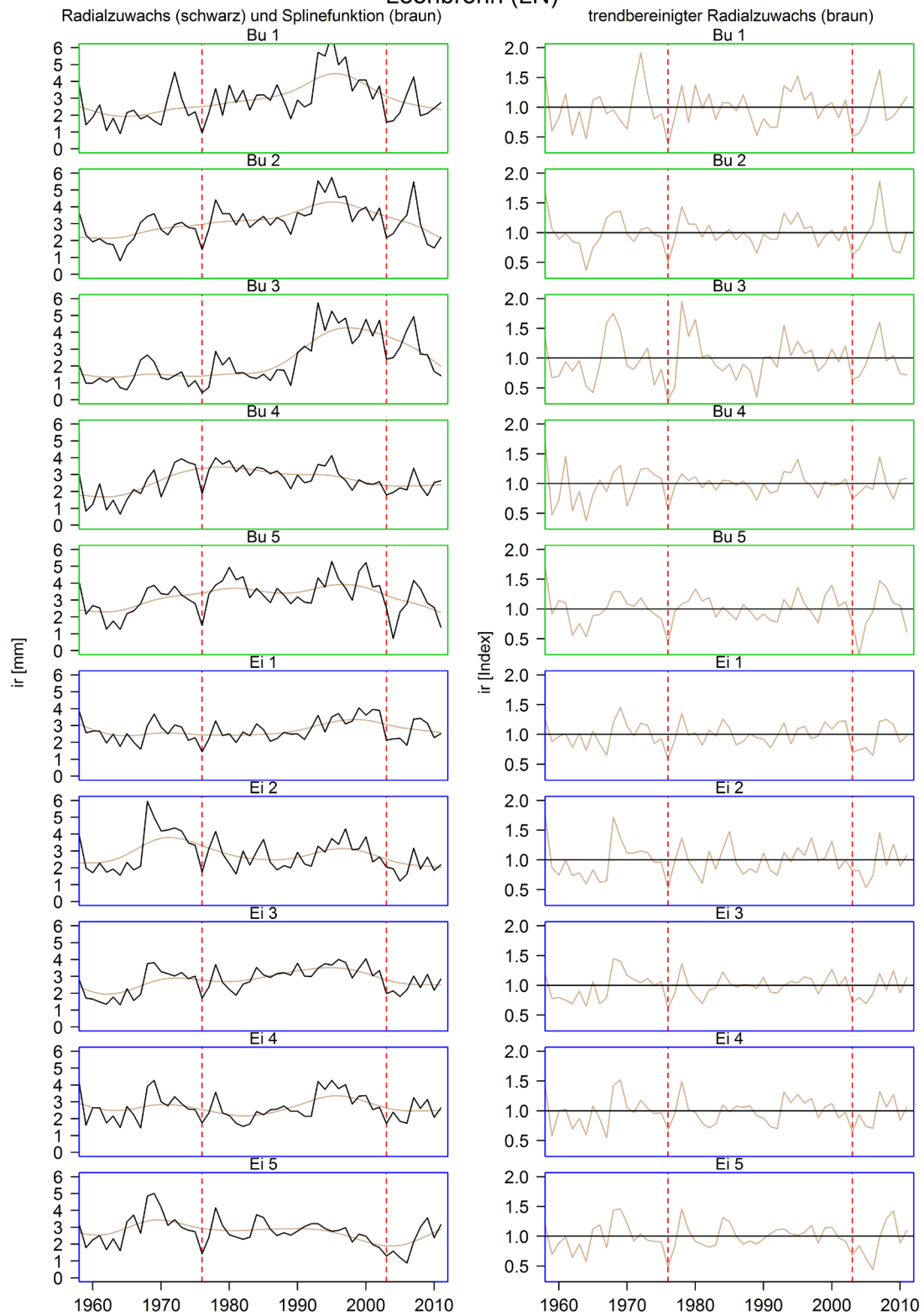




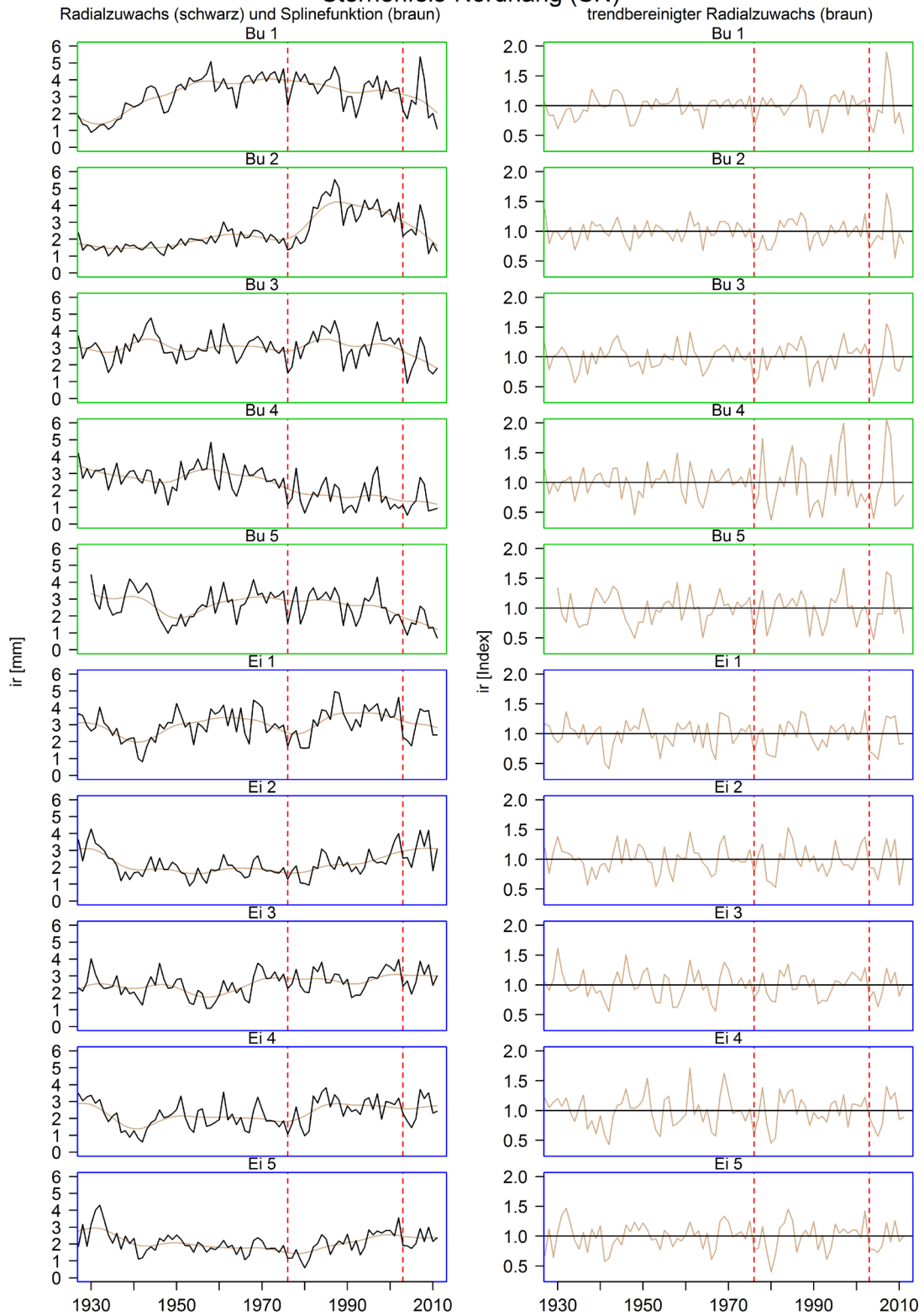
Sulzburg (SU)

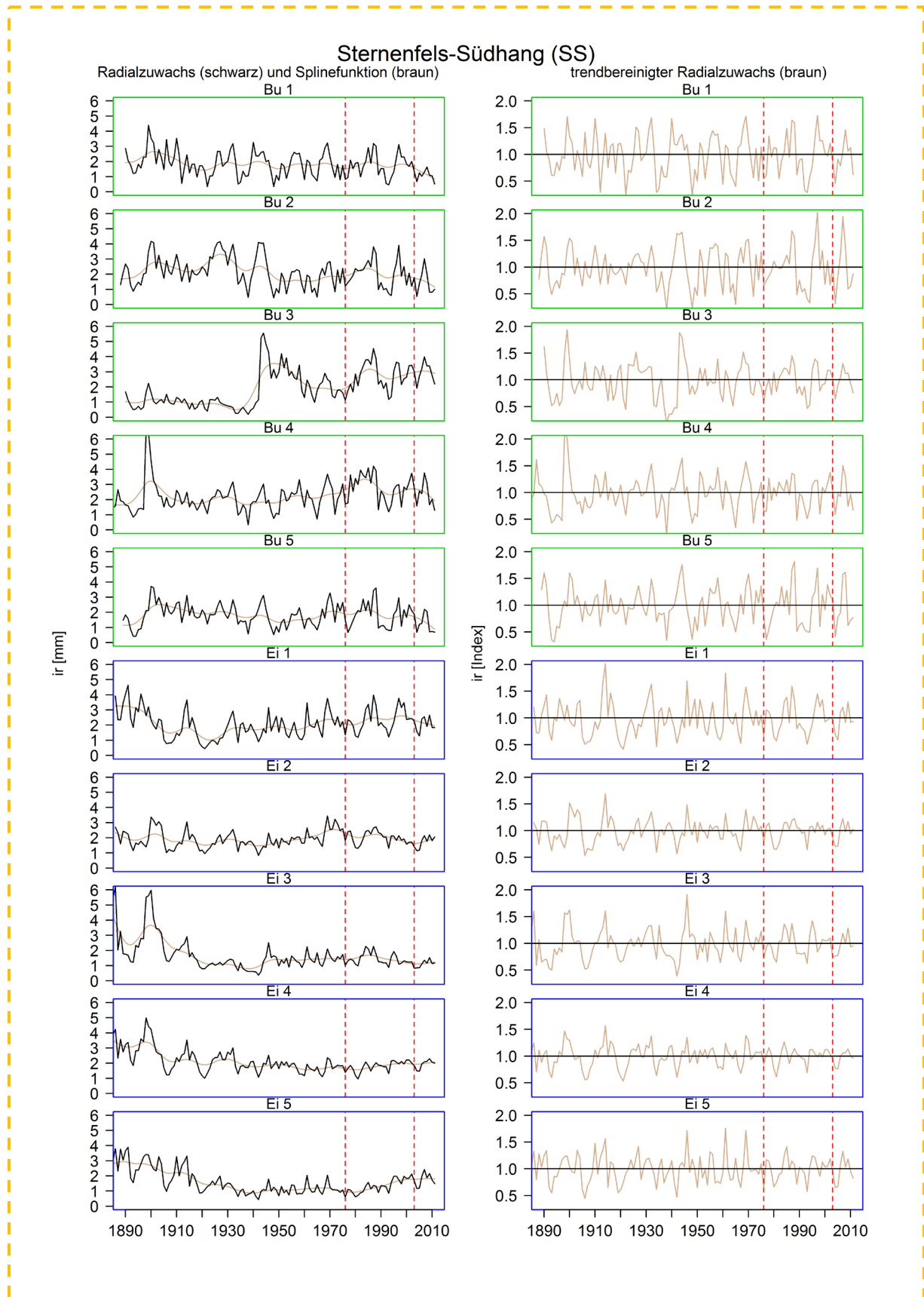


Leonbronn (LN)

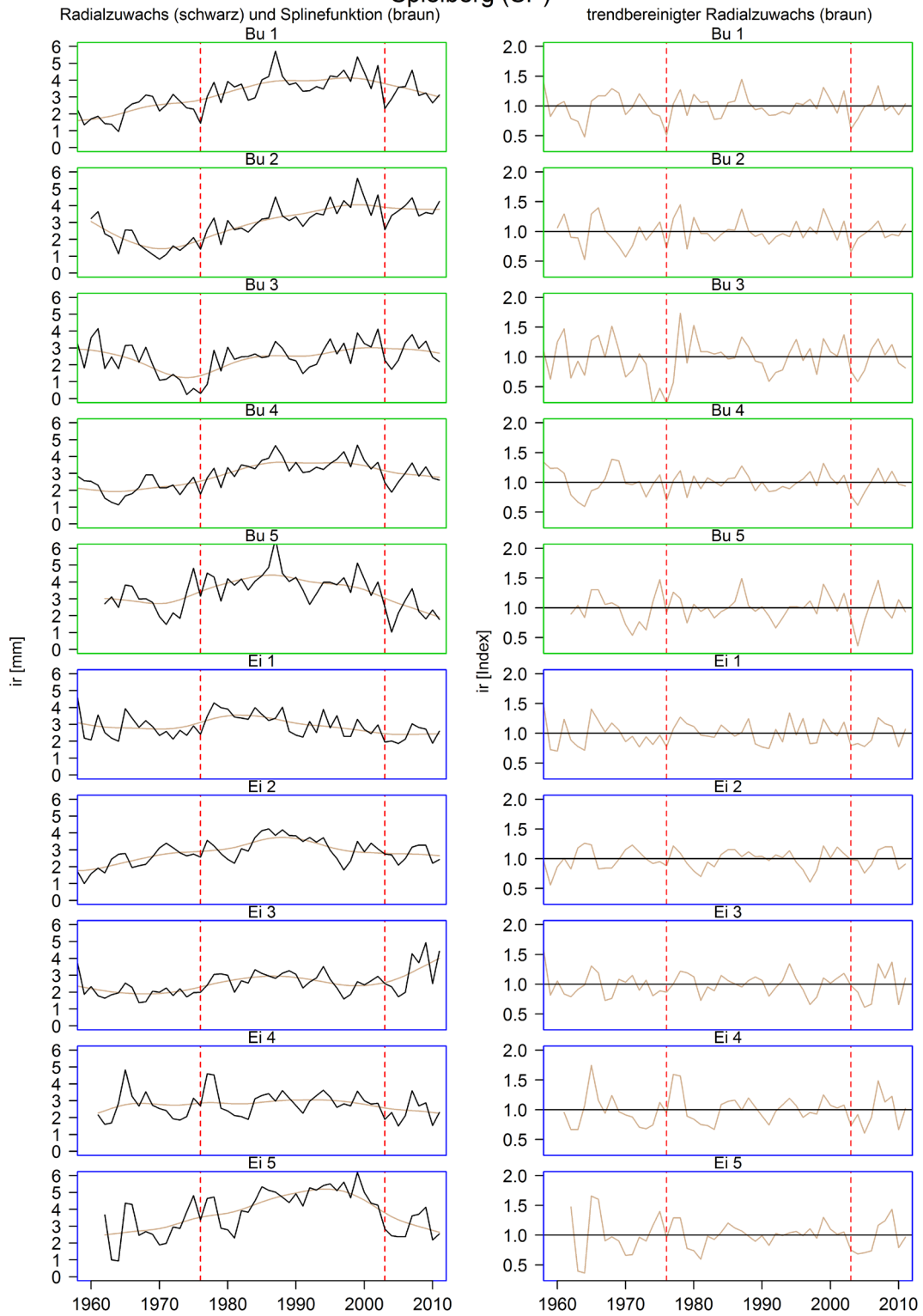


Sternenfels-Nordhang (SN)





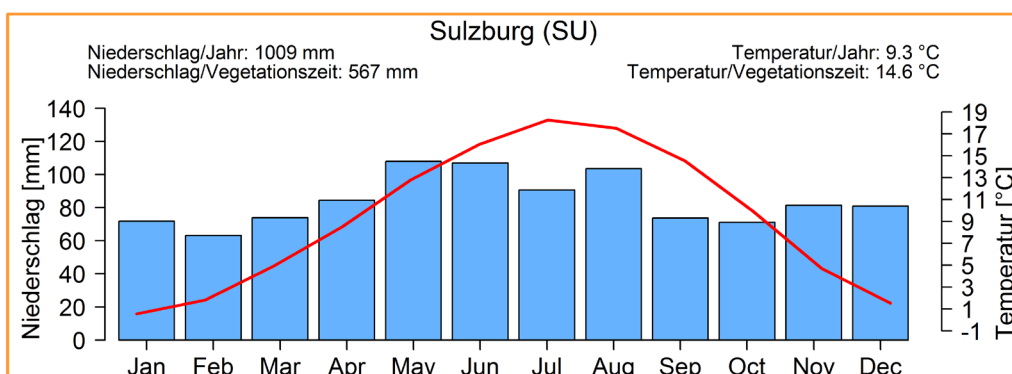
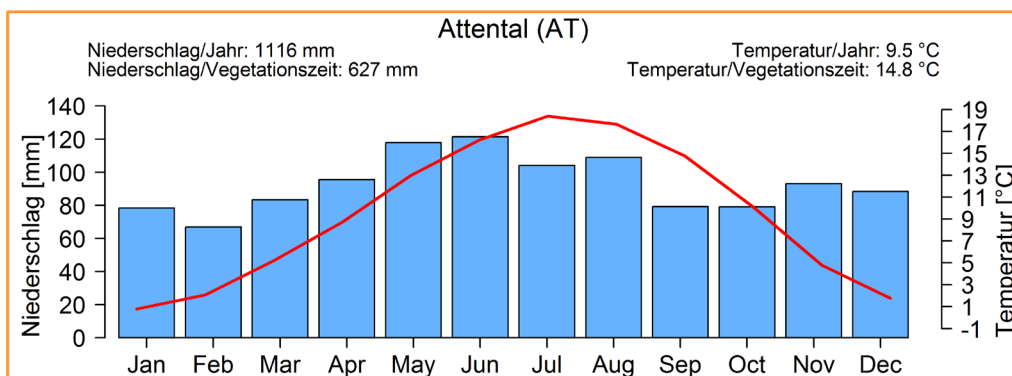
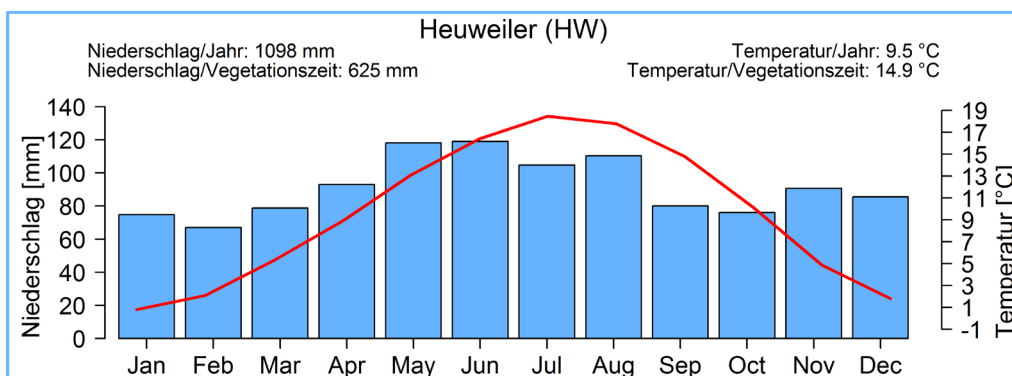
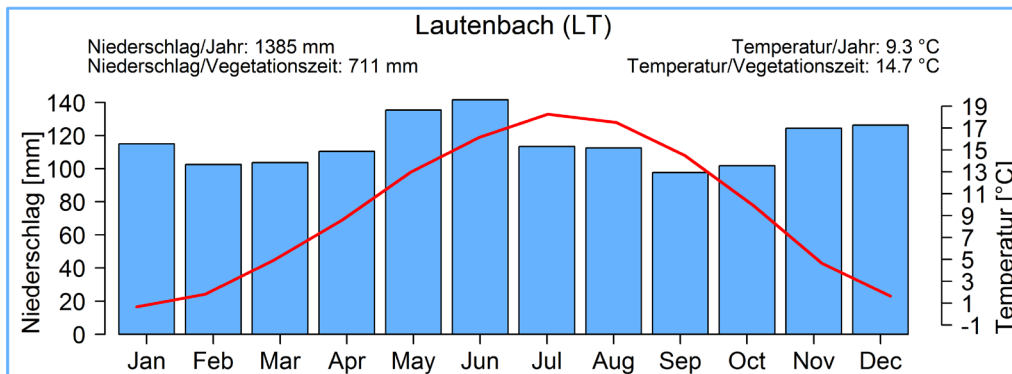
Spielberg (SP)

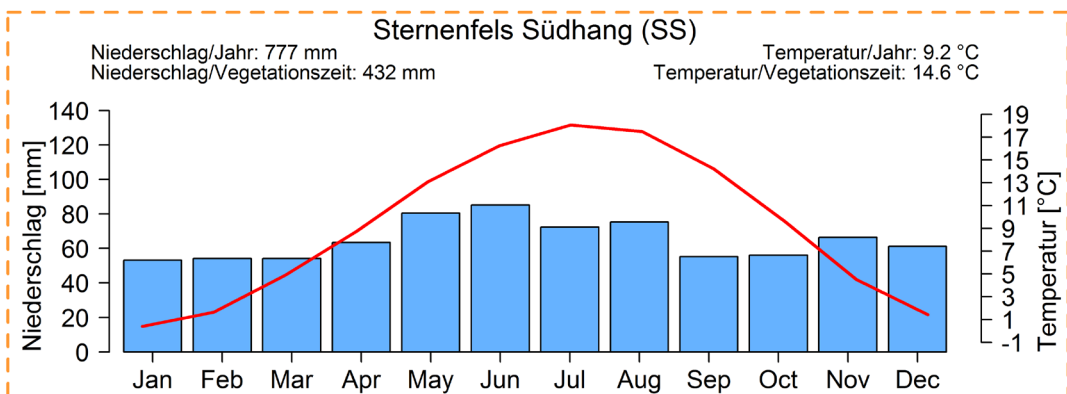
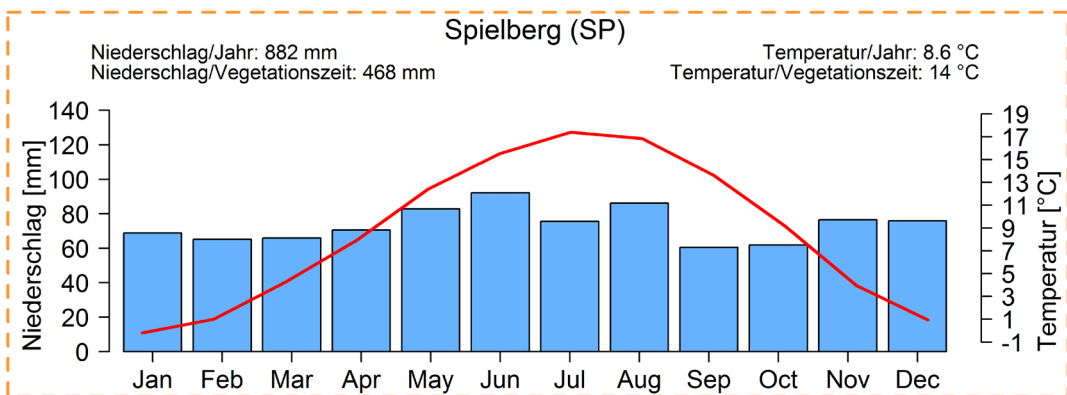
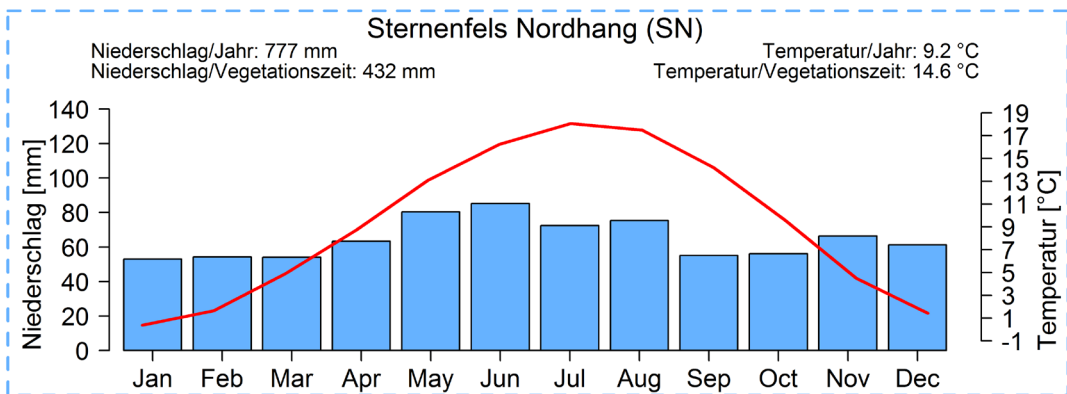
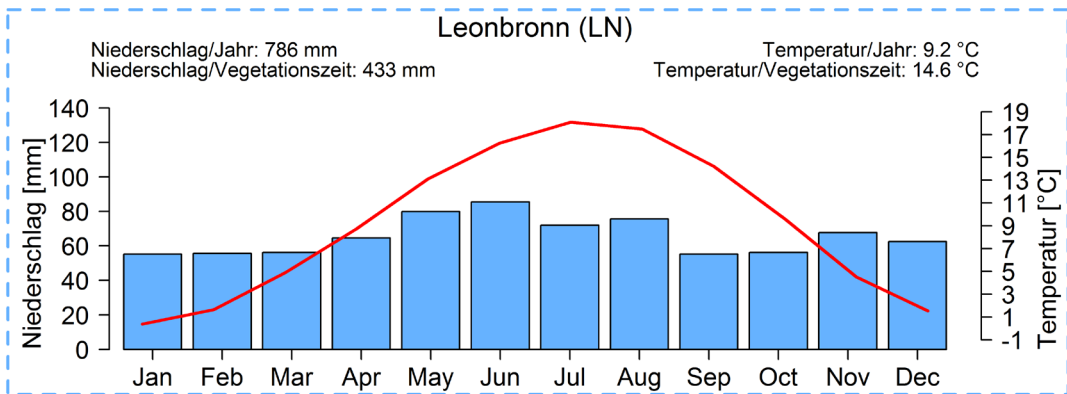


Anhang

Anhang 7: Klimadiagramme aller Untersuchungsstandorte, basierend auf den DWD-Rasterdaten für den Bezugszeitraum der Klimanormale (1961-1990)

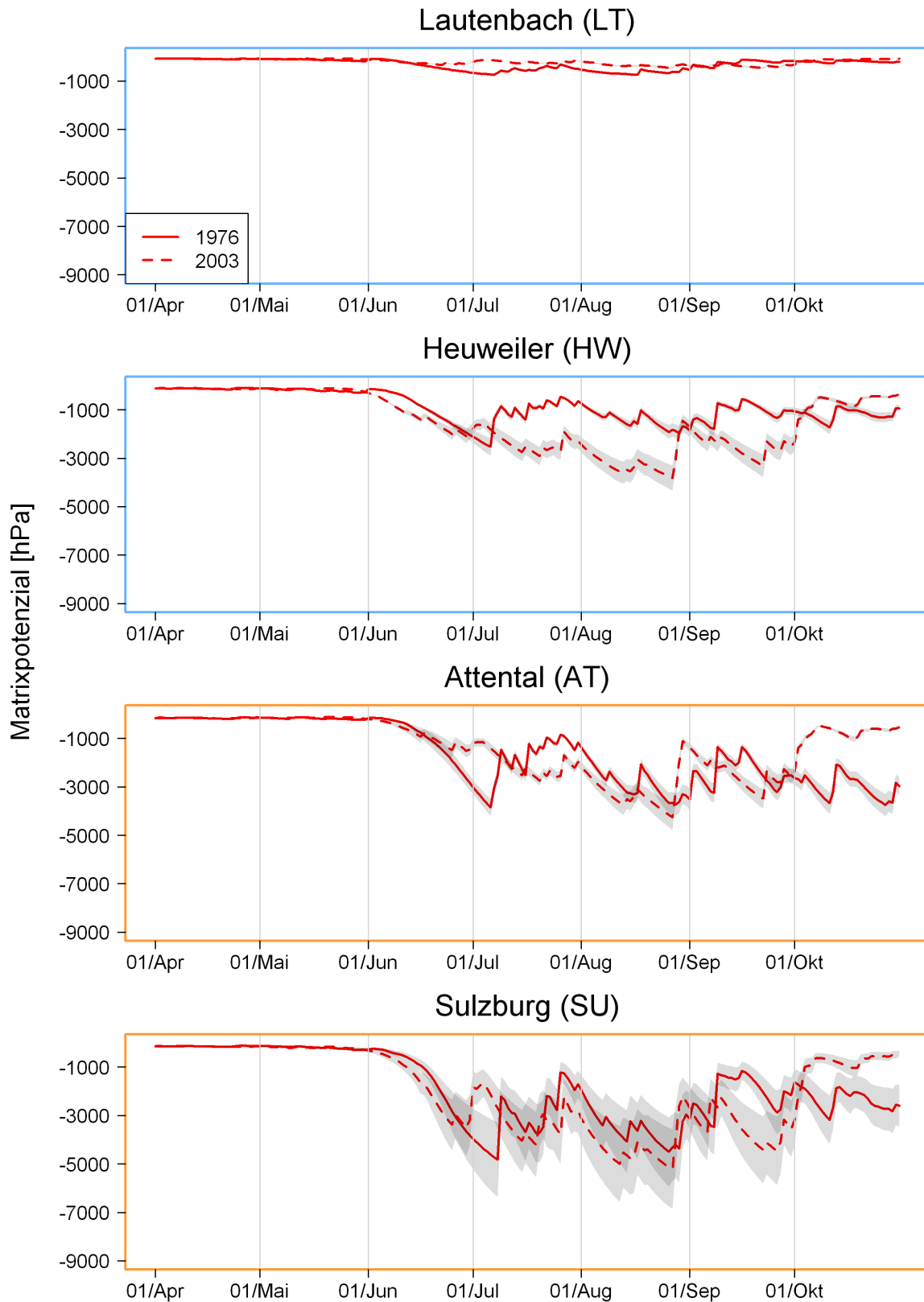
Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

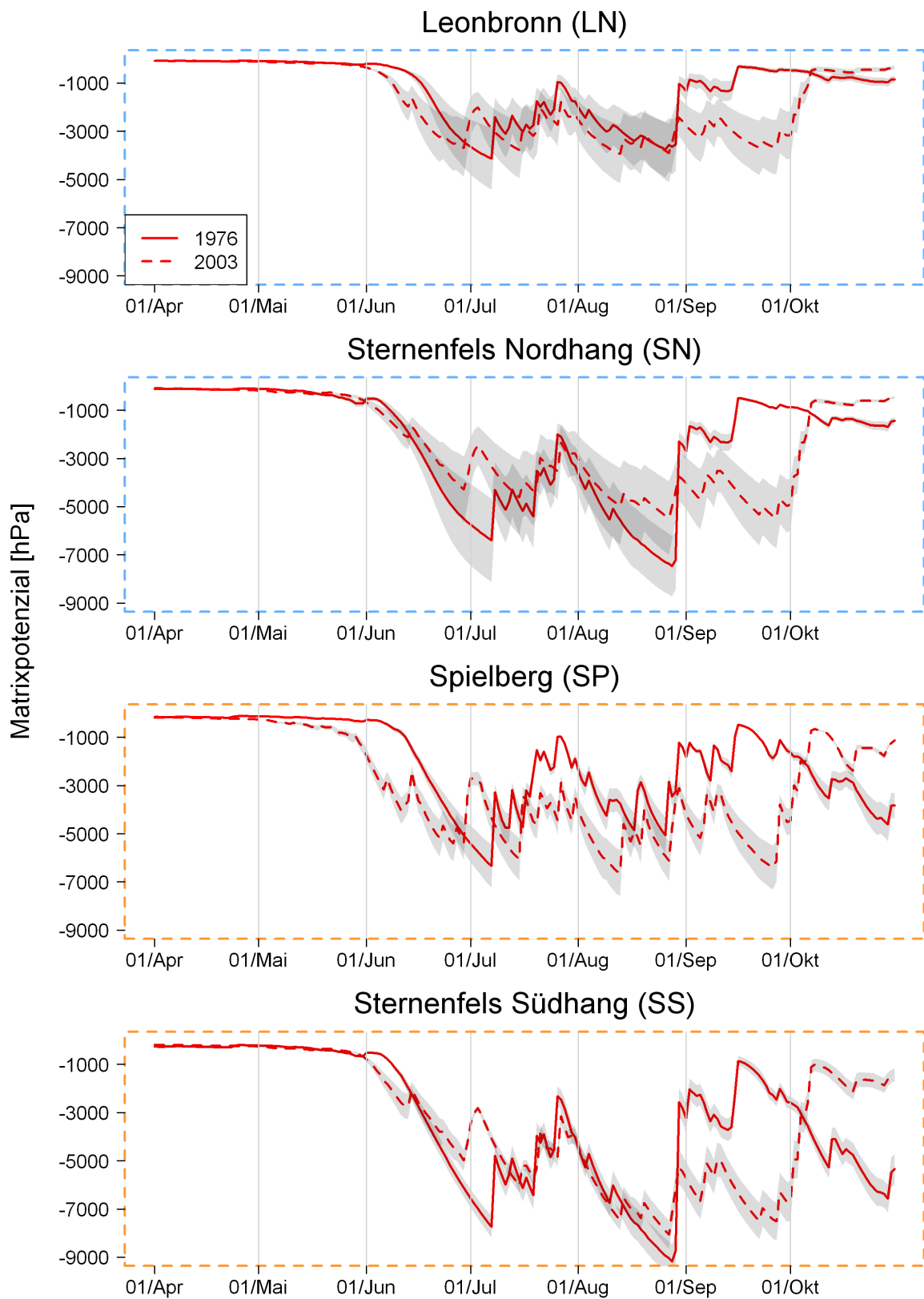




Anhang 8: Vergleich des Verlaufs der Matrixpotenzialwerte in den Trockenjahren 1976 und 2003 an allen Untersuchungsstandorten

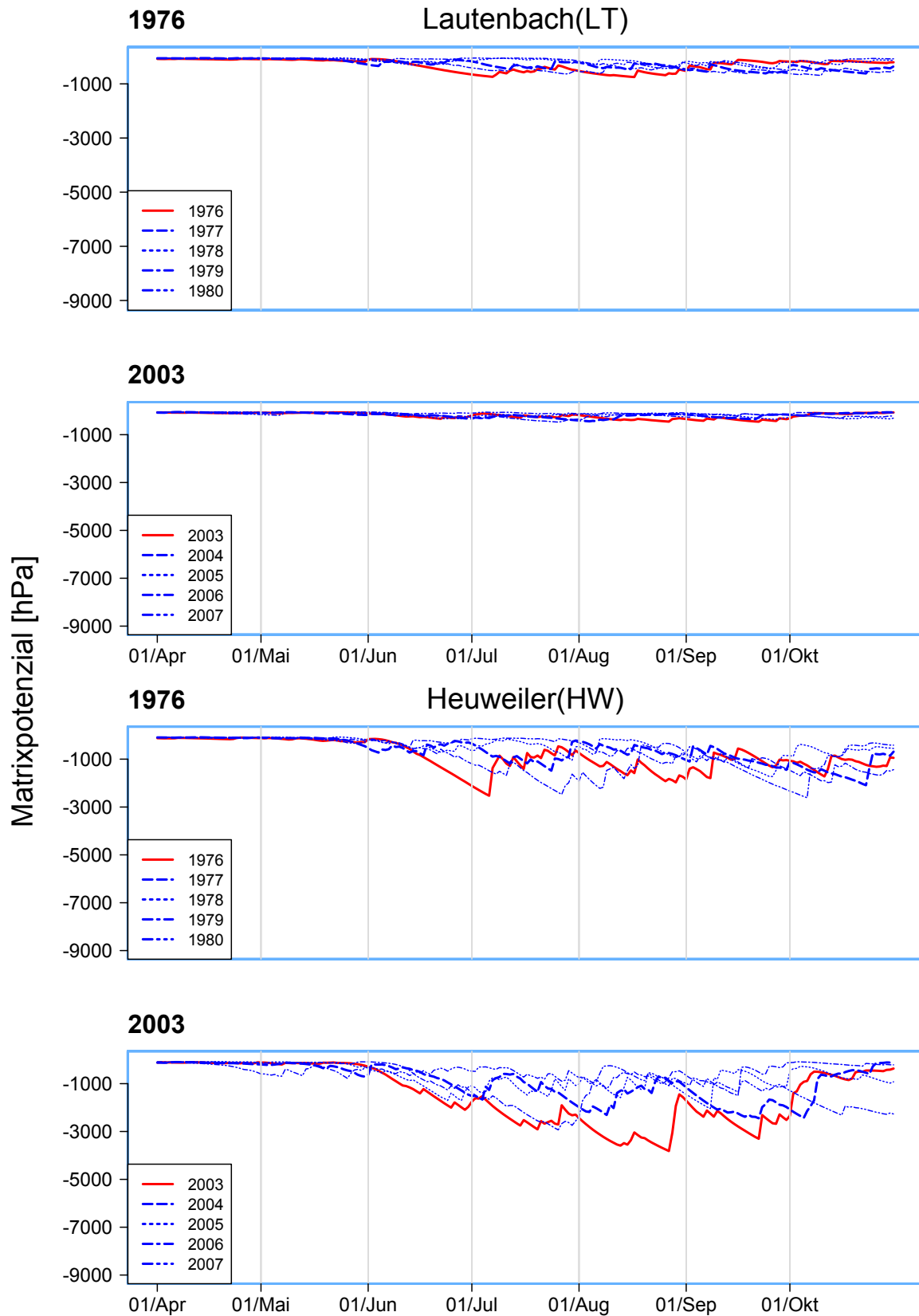
Pro Jahr ist der Mittelwert aus sechs Zeitreihen dargestellt, graue Bereiche: Standardfehler, Quelle: Simulation mit LWF-BROOK-90. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

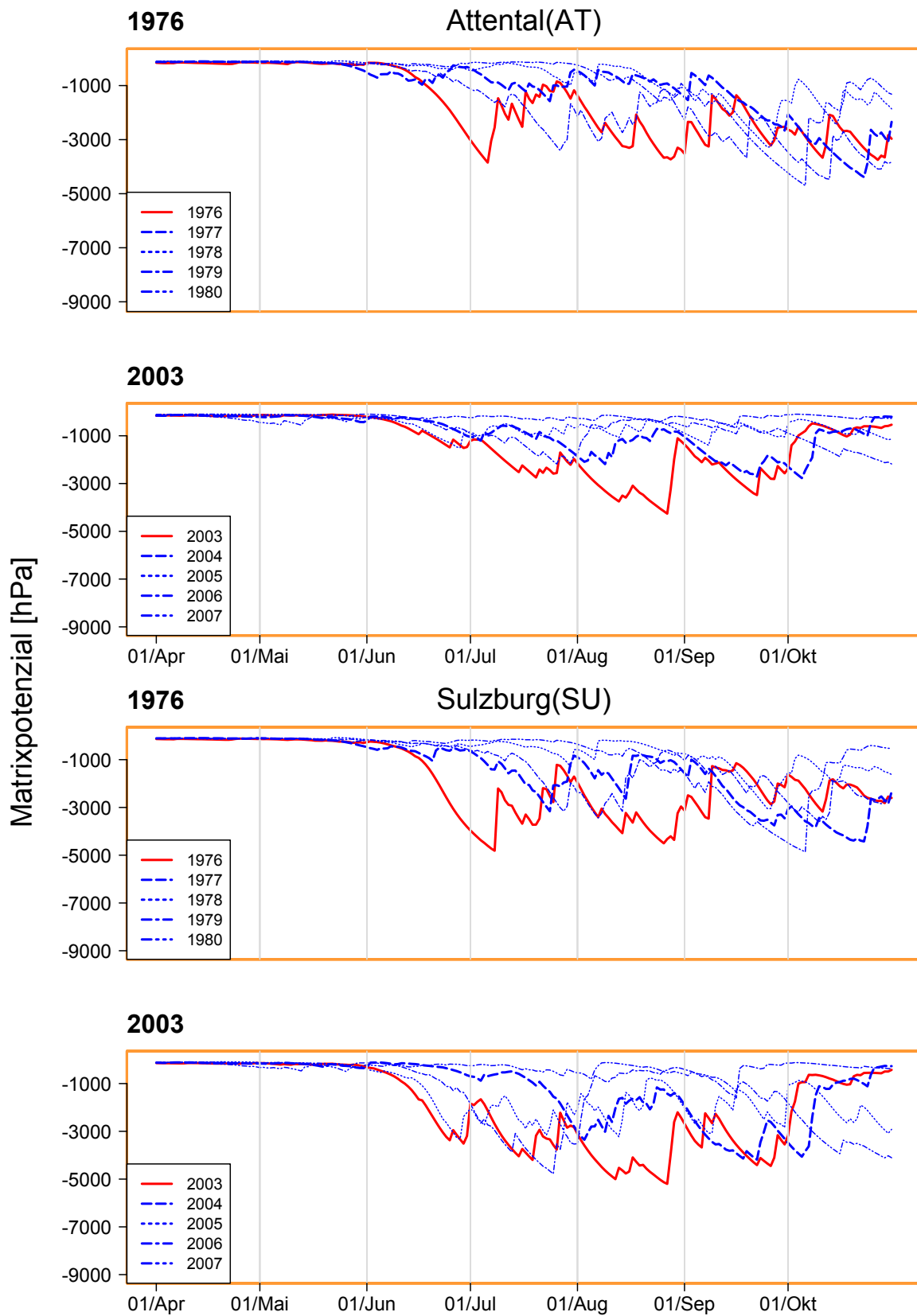


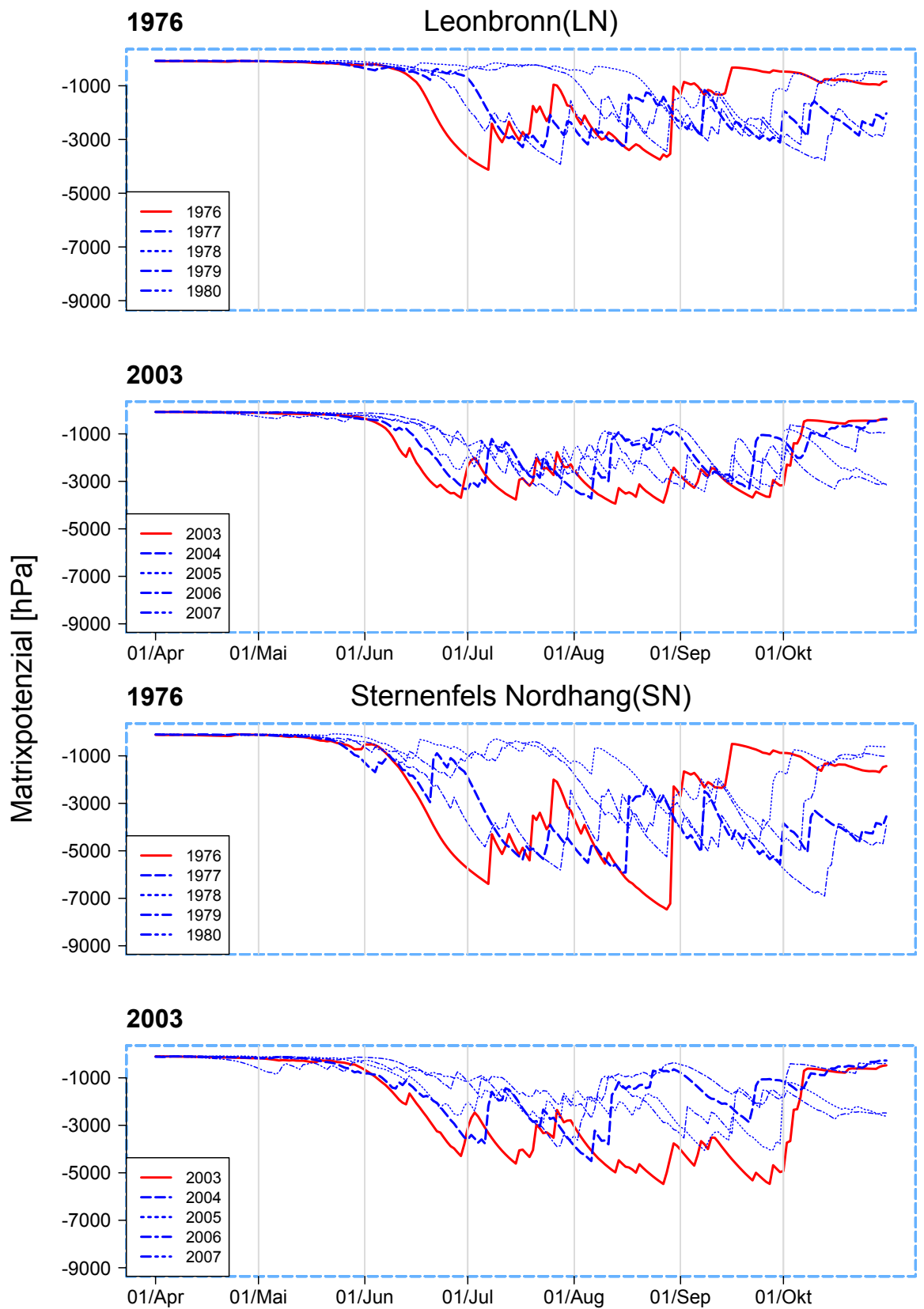


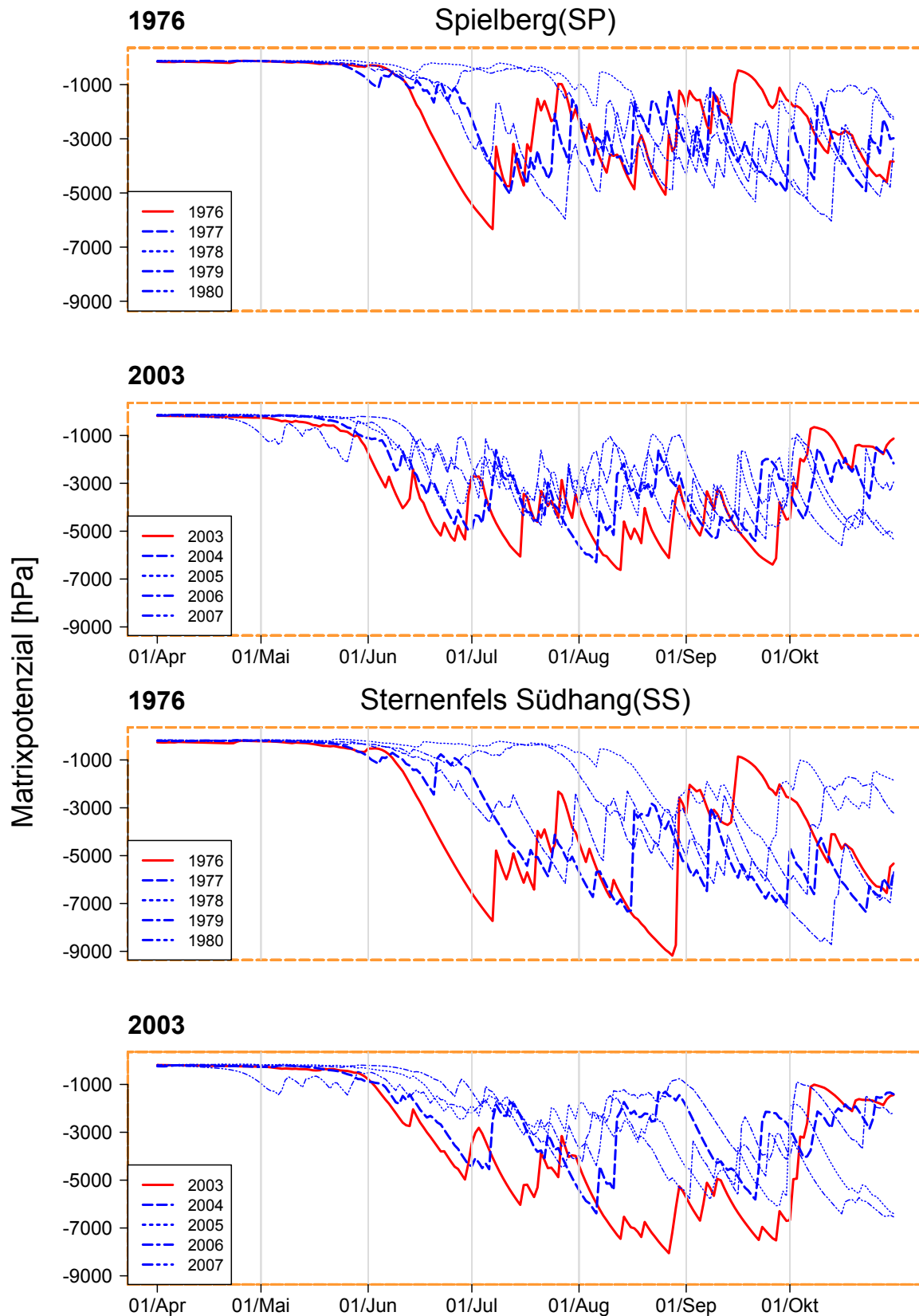
Anhang 9: Vergleich des Verlaufs der Matrixpotenzialwerte in den Trockenjahren 1976 und 2003 und den vier darauffolgenden Jahren an allen Untersuchungsstandorten

Pro Jahr ist der Mittelwert aus sechs Zeitreihen dargestellt, Quelle: Simulation mit LWF-BROOK-90. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

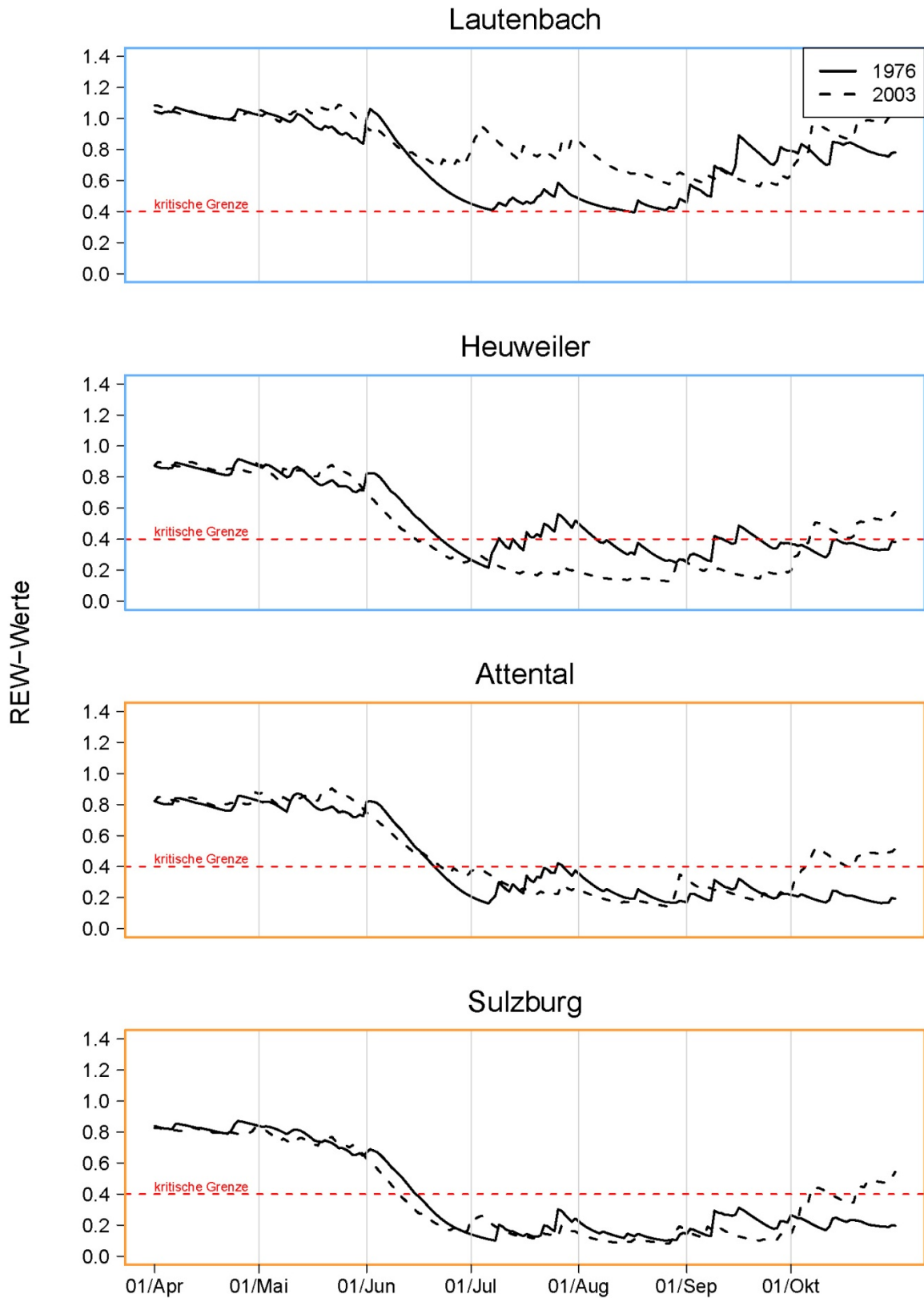


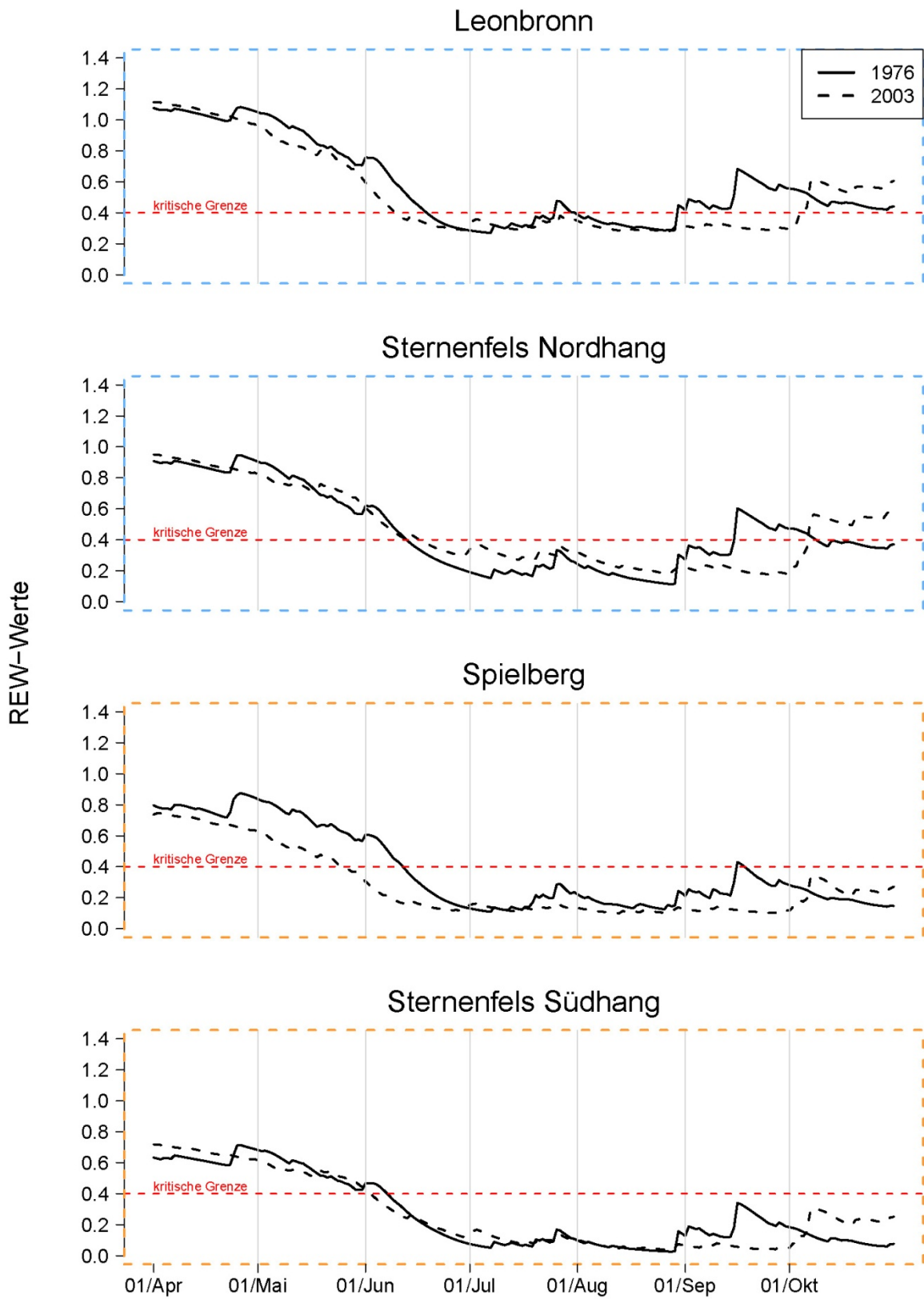






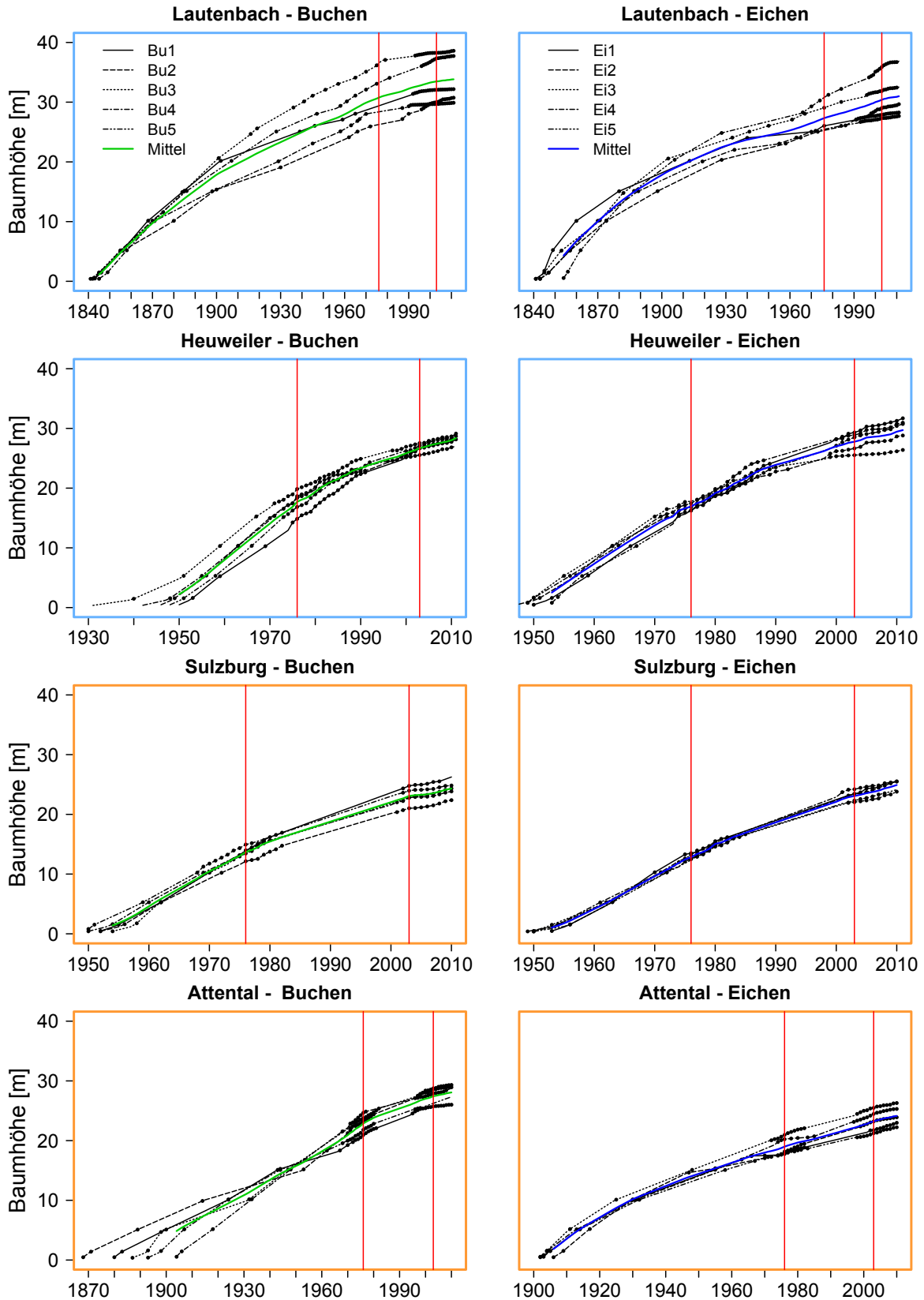
Anhang 10: Verlauf des Anteils an relativem pflanzenverfügbarem Wasser (REW-Werte) an allen Untersuchungsstandorten in den Trockenjahren 1976 und 2003.

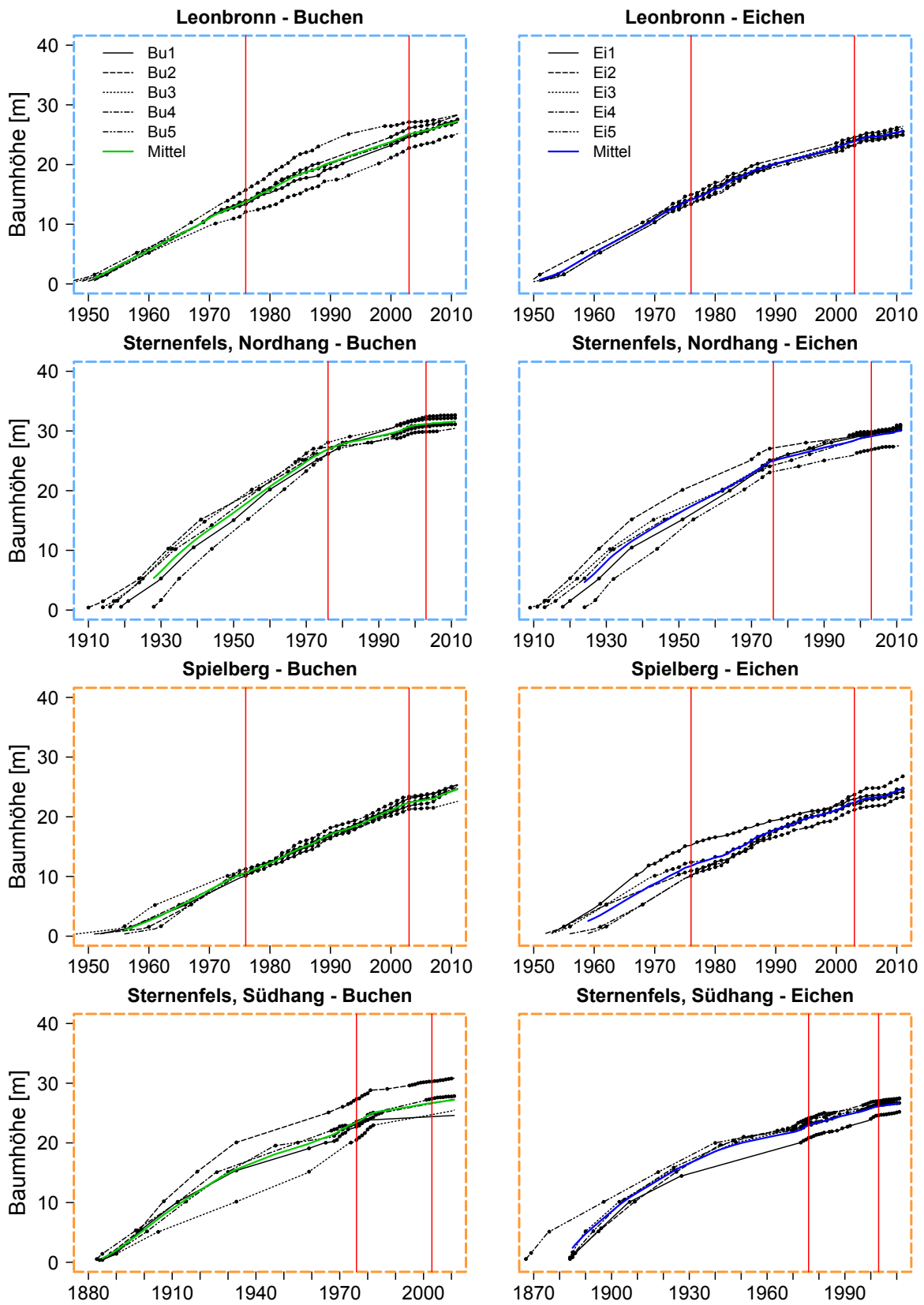




Anhang 11: Höhenwachstum der Einzelbäume und Mittelwert der Standort-Baumart-Kombination.

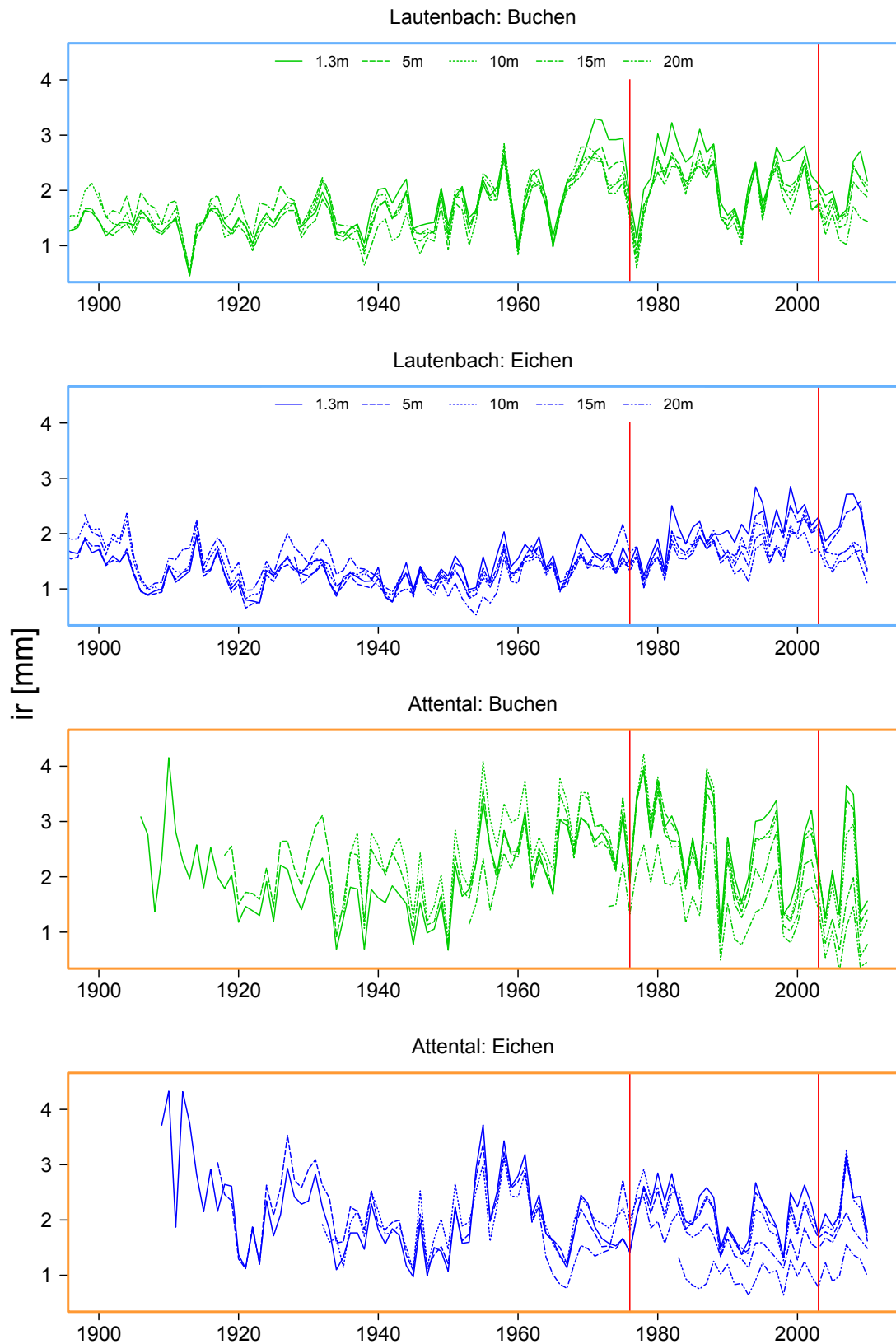
Anhand von Triebbasisnarben oder Kronenscheiben nachgewiesene Höhenzuwächse sind mit schwarzen Punkten auf der jeweiligen Wachstumskurve gekennzeichnet. Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.



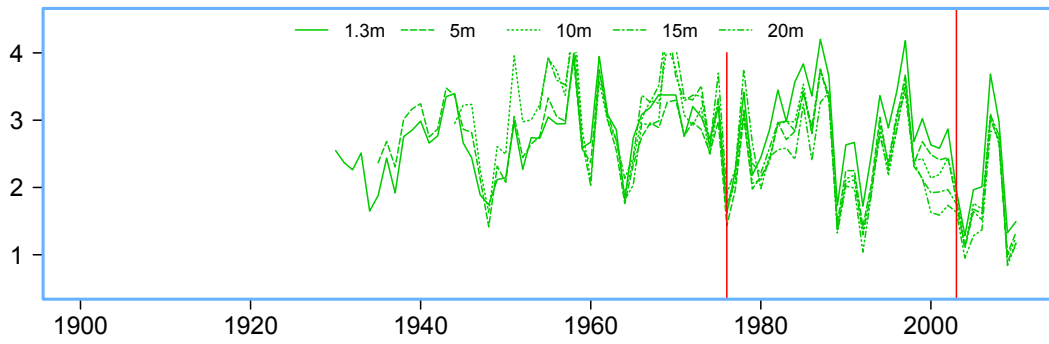


Anhang 12: Mittlere Radialzuwachsreihe der Standort-Baumart-Kombination in verschiedenen Stammhöhen

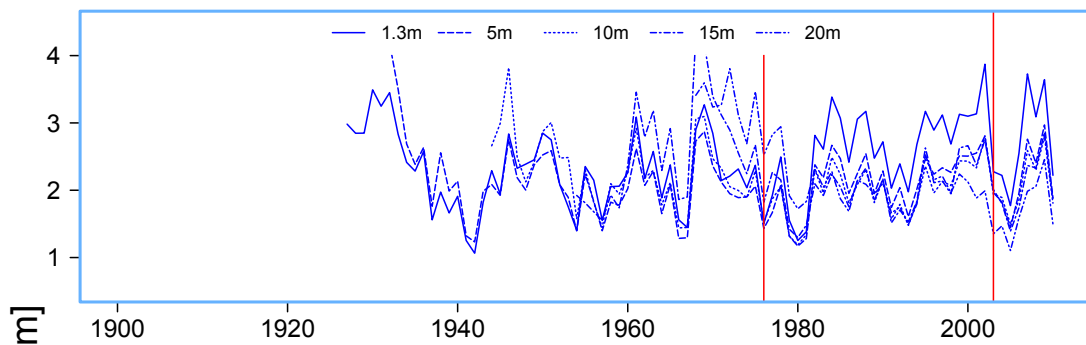
Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.



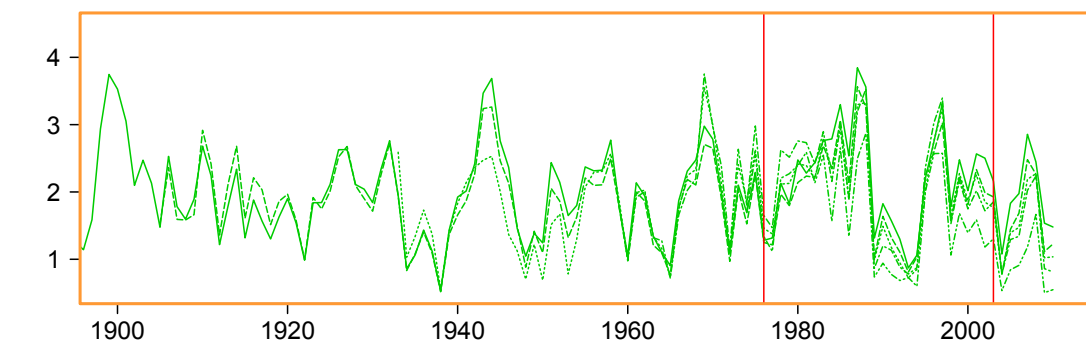
Sternenfels-Nordhang: Buchen



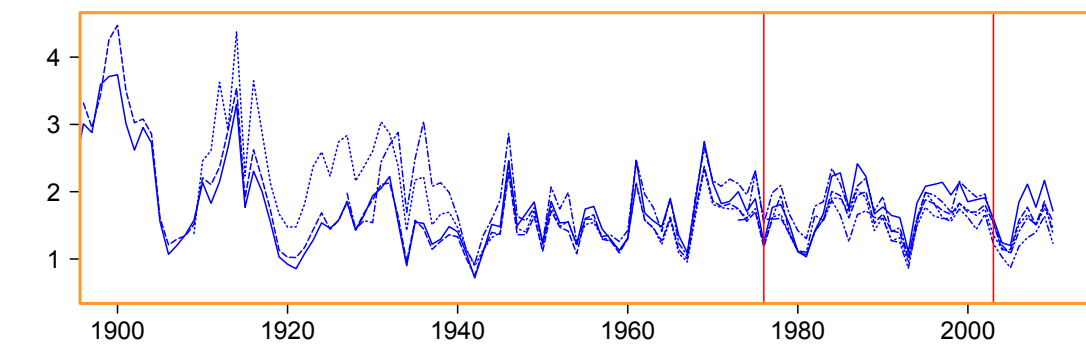
Sternenfels-Nordhang: Eichen

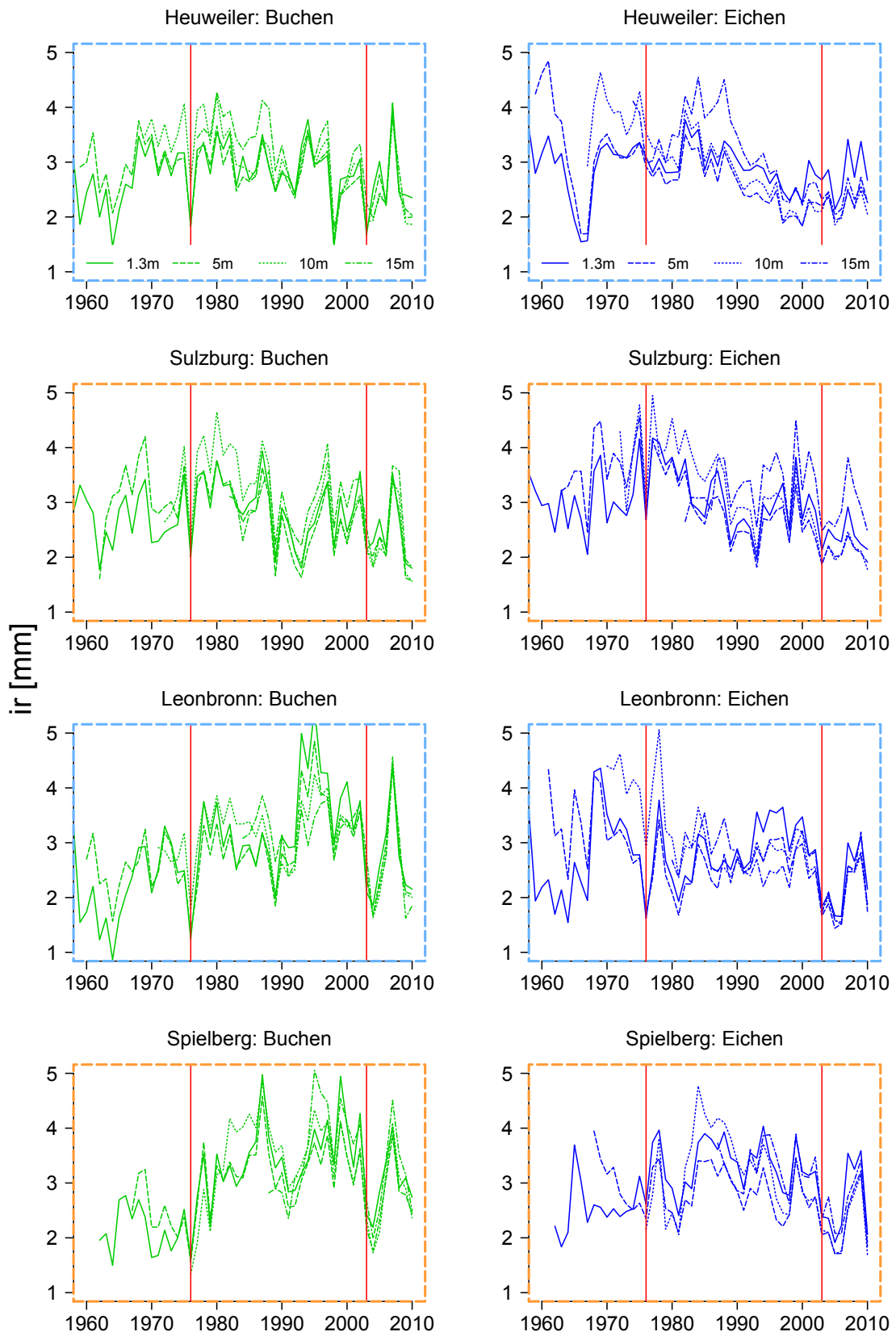


Sternenfels-Südhang: Buchen



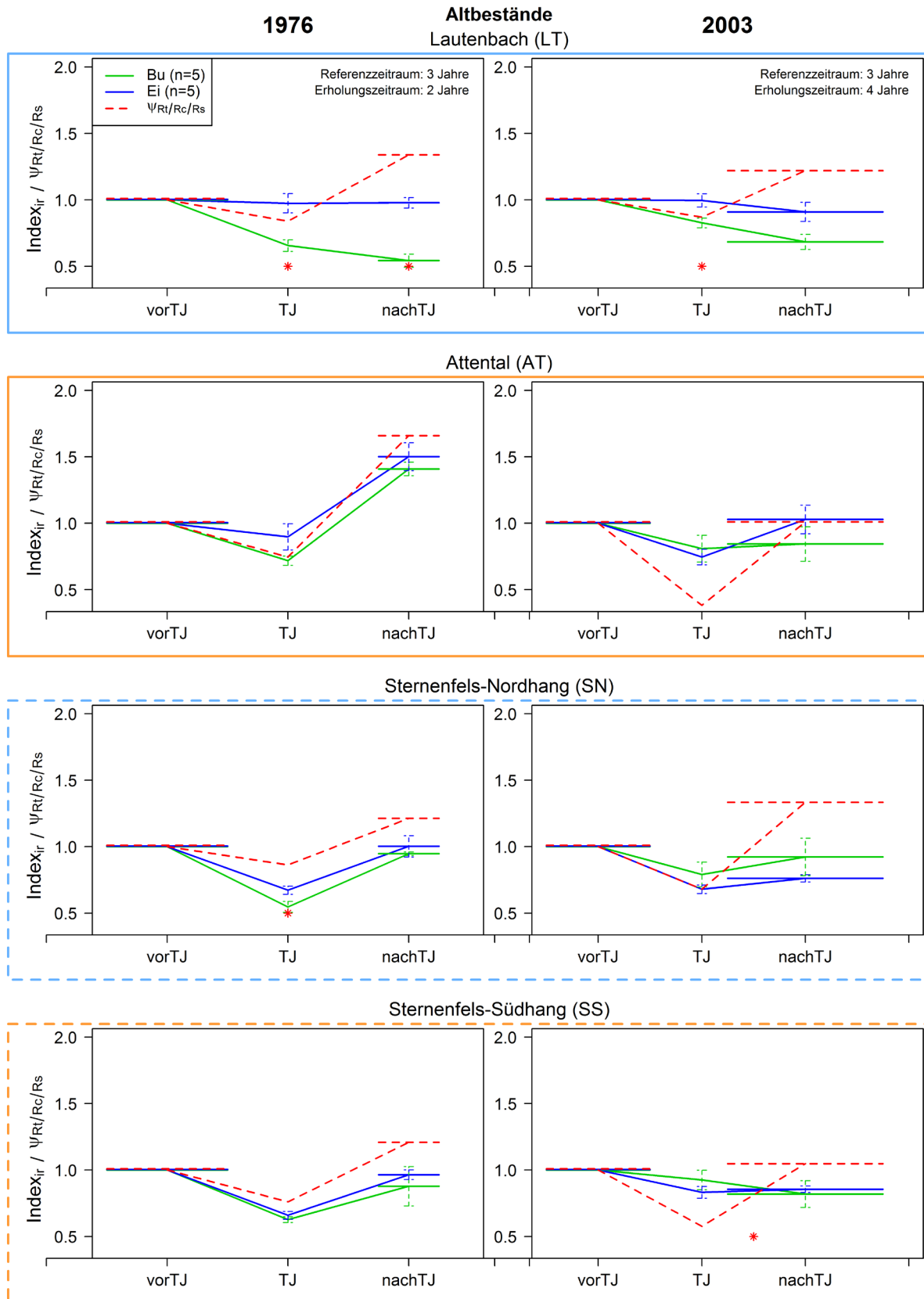
Sternenfels-Südhang: Eichen

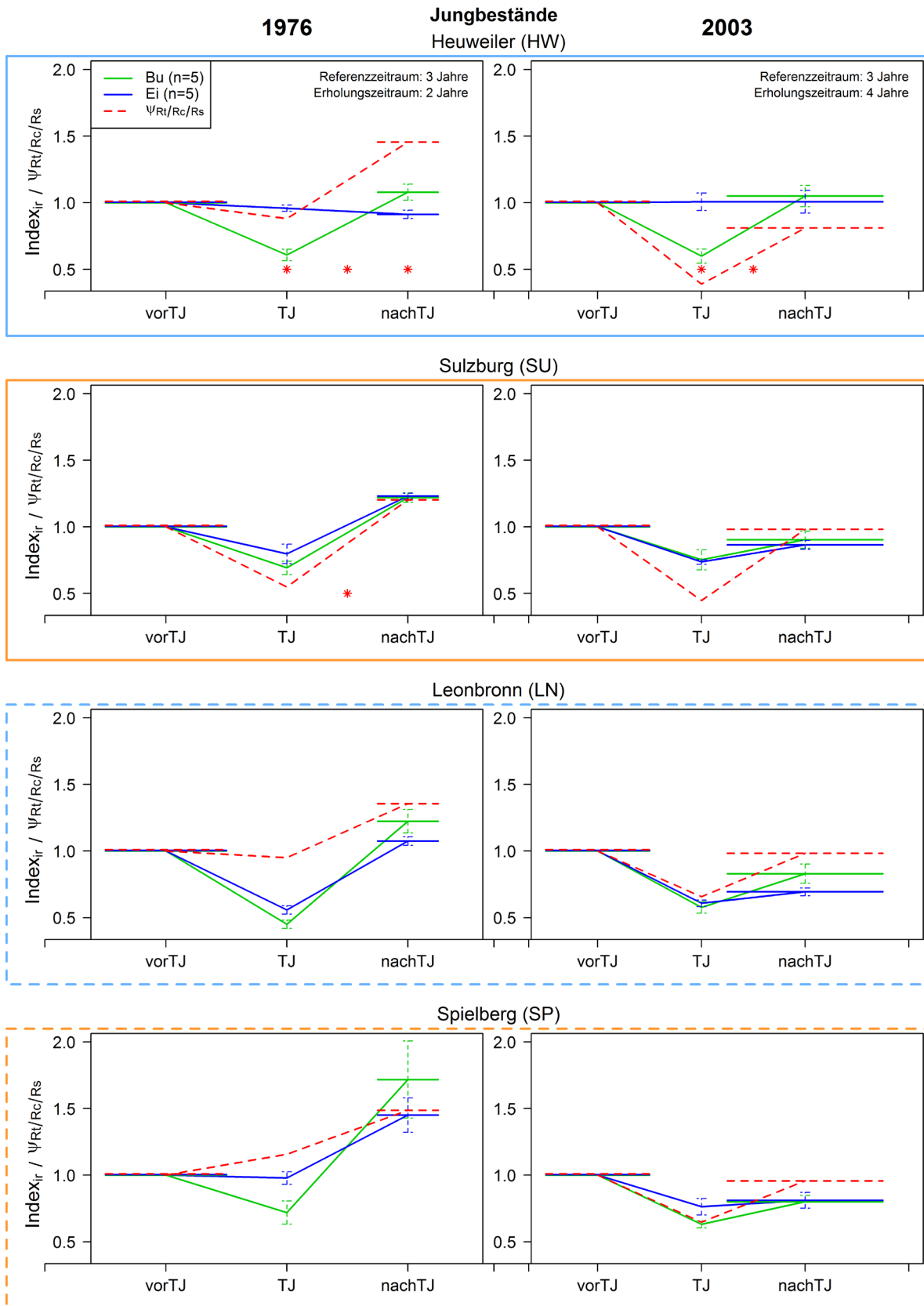




Anhang 13: Trockenstressreaktion von Buchen und Eichen und relatives Matrixpotenzial ($\Psi_{Rt/Rc/Rs}$: April-Sept) 1976 (linke Spalte) und 2003 (rechte Spalte) an den einzelnen Untersuchungsstandorten. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Baumarten sind mit rotem Sternchen gekennzeichnet.

Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.



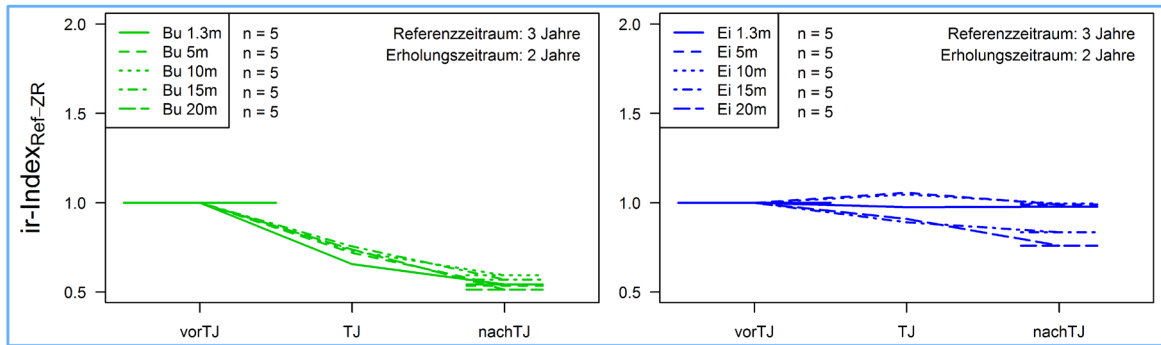


Anhang 14: Trockenstressreaktion von Buchen (linke Spalte) und Eichen (rechte Spalte) in verschiedenen Stammhöhen an den einzelnen Untersuchungsstandorten.

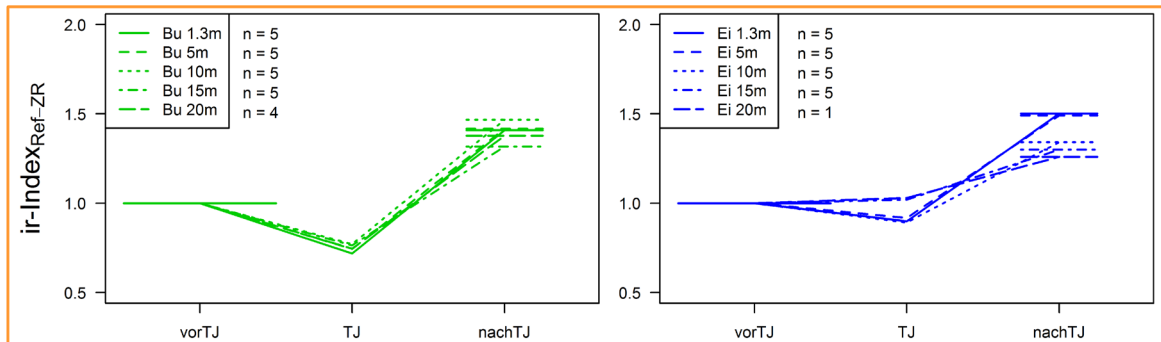
Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Altbestände - 1976

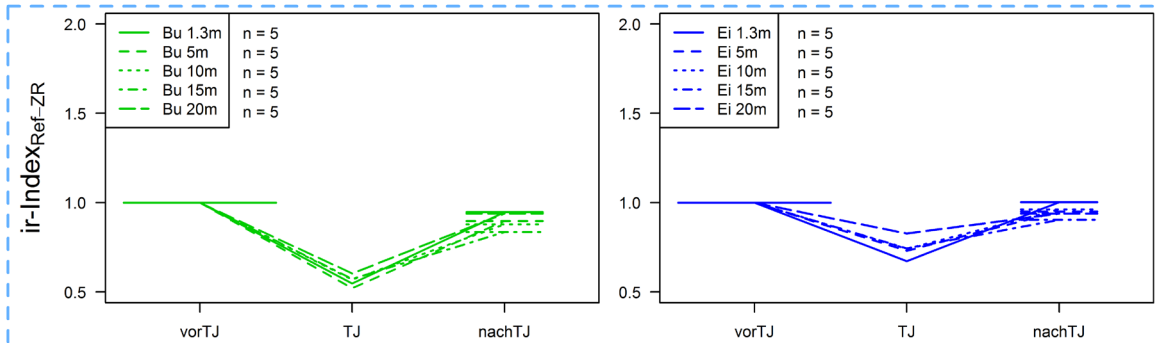
Lautenbach (LT)



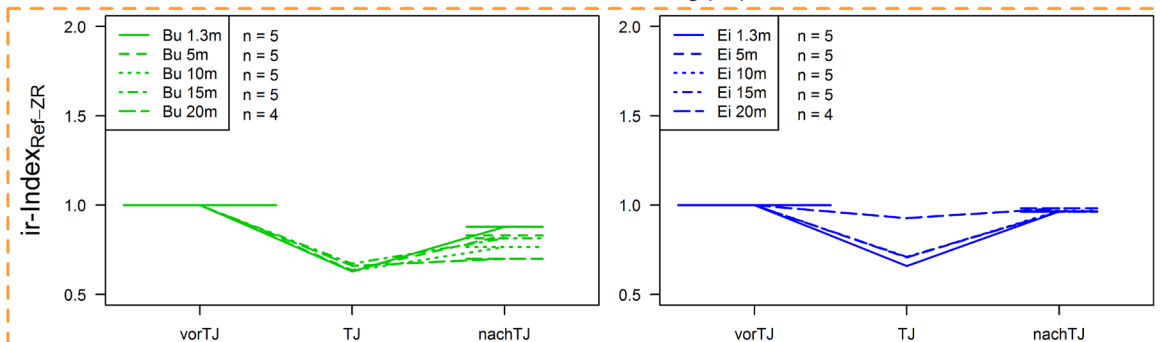
Attental (AT)



Sternenfels-Nordhang (SN)

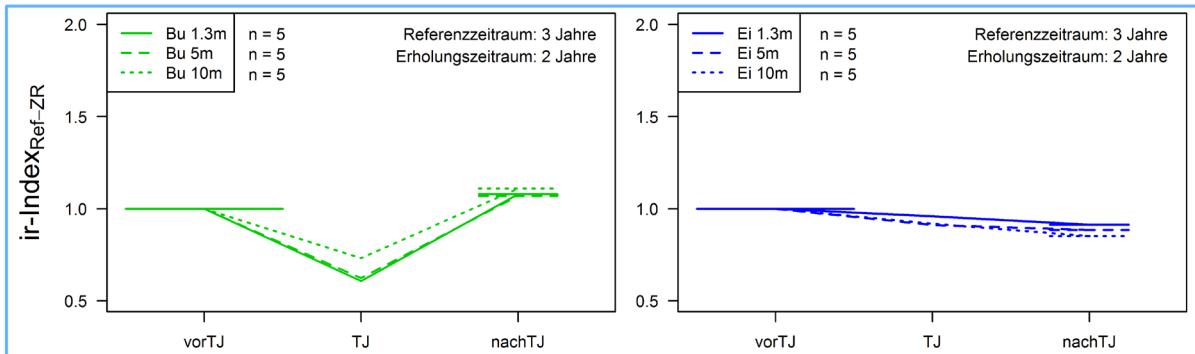


Sternenfels-Südhang (SS)

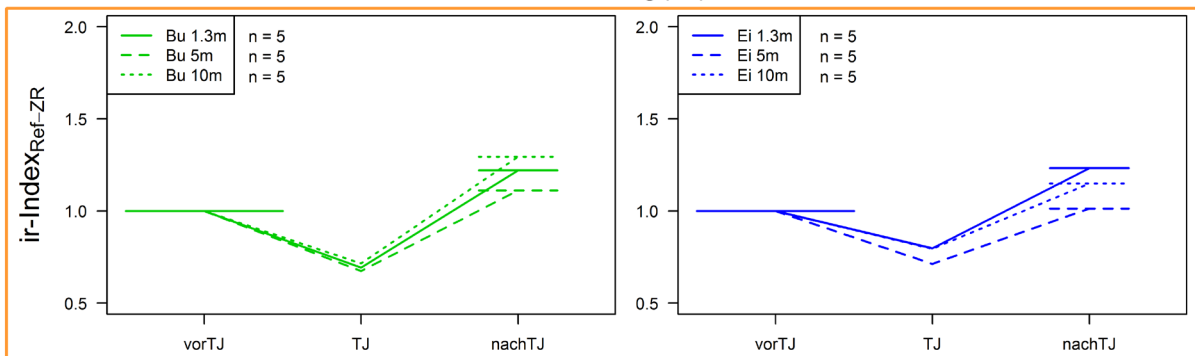


Jungbestände - 1976

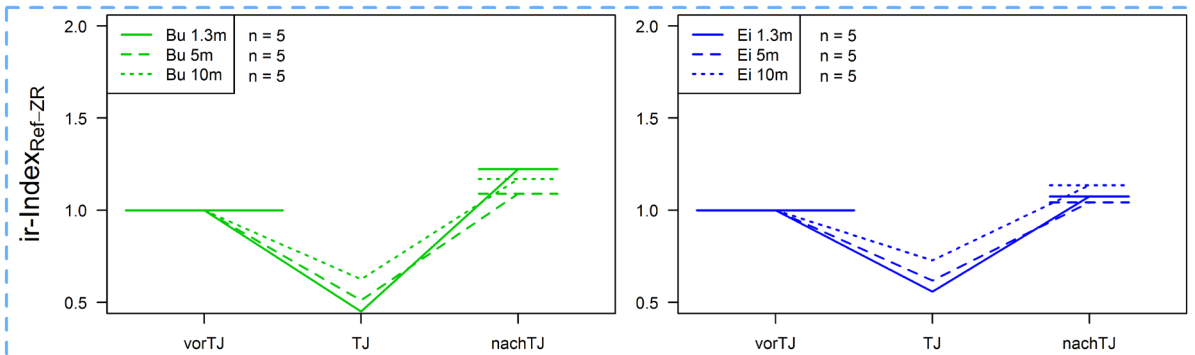
Heuweiler (HW)



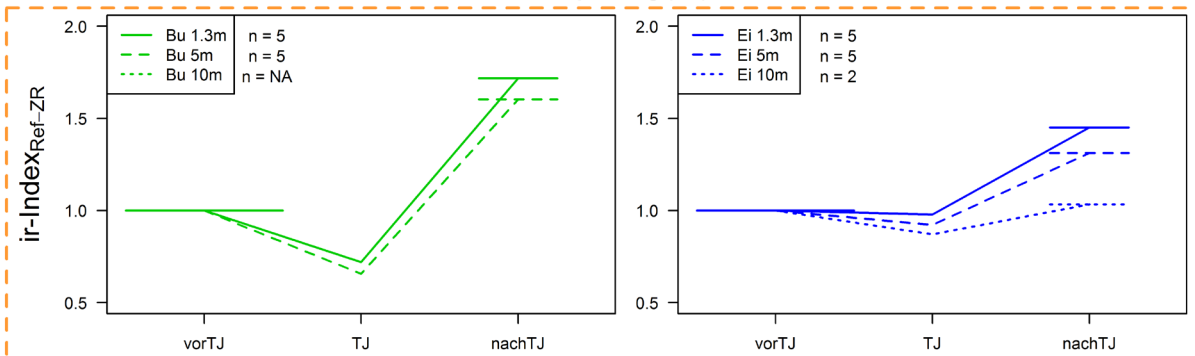
Sulzburg (SU)



Leonbronn (LN)

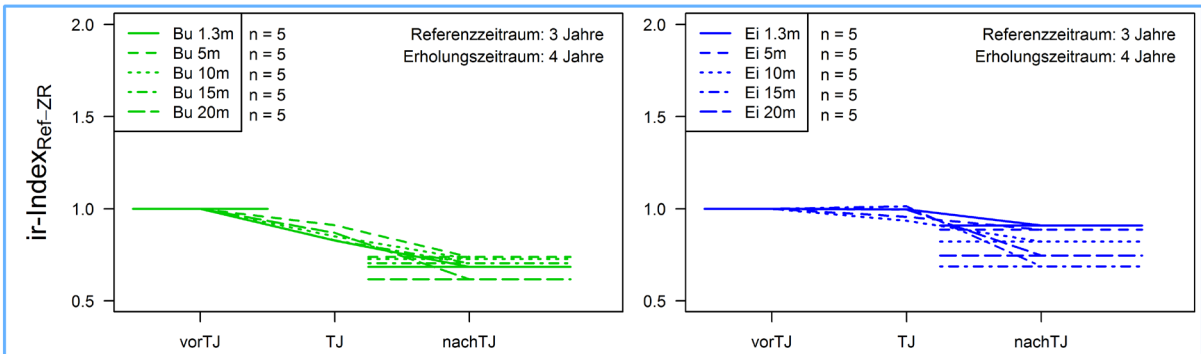


Spielberg (SP)

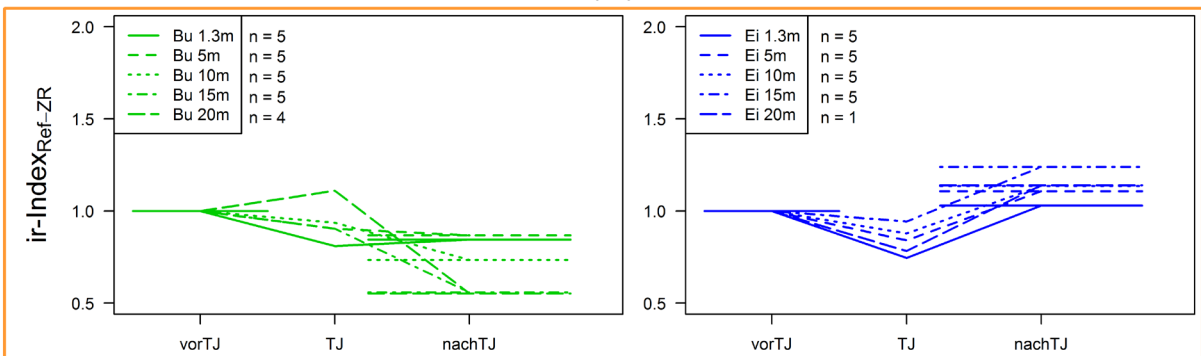


Altbestände - 2003

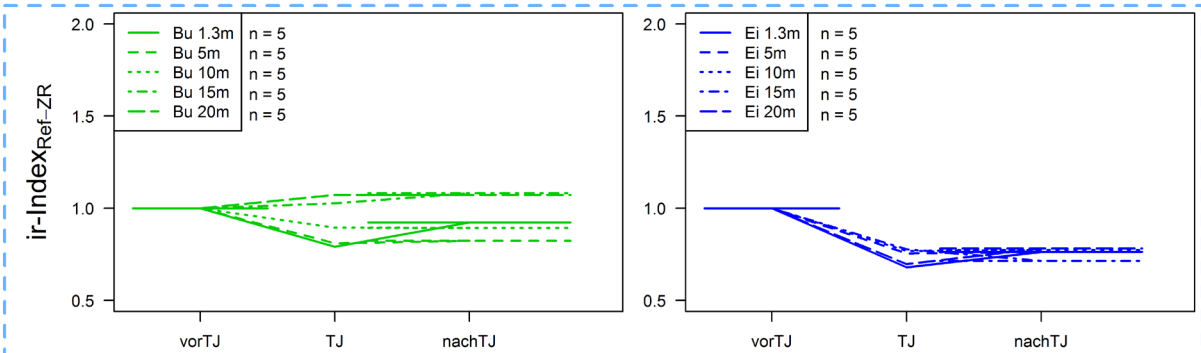
Lautenbach (LT)



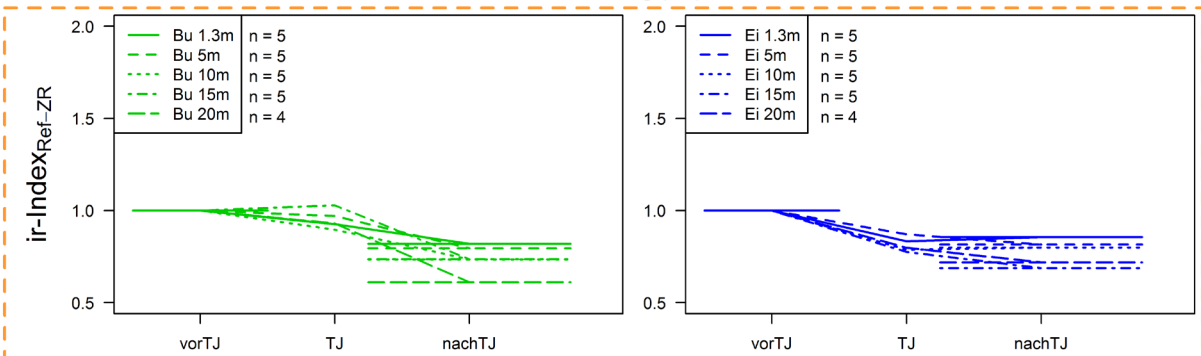
Attental (AT)



Sternenfels-Nordhang (SN)

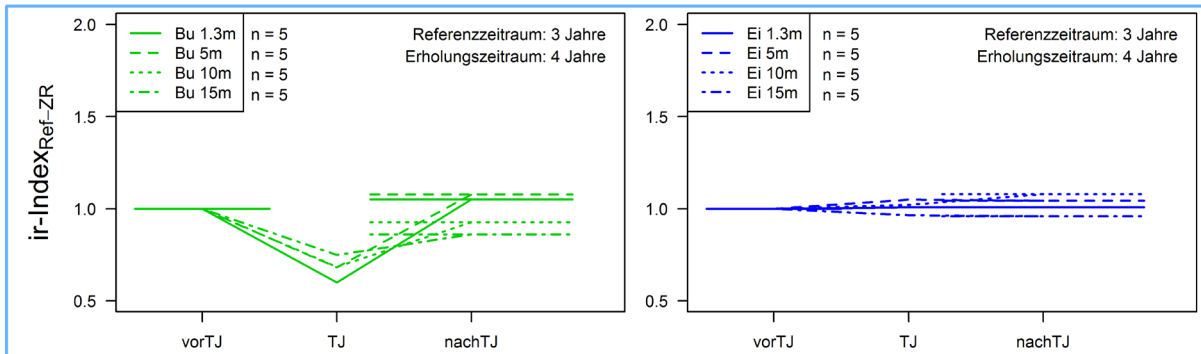


Sternenfels-Südhang (SS)

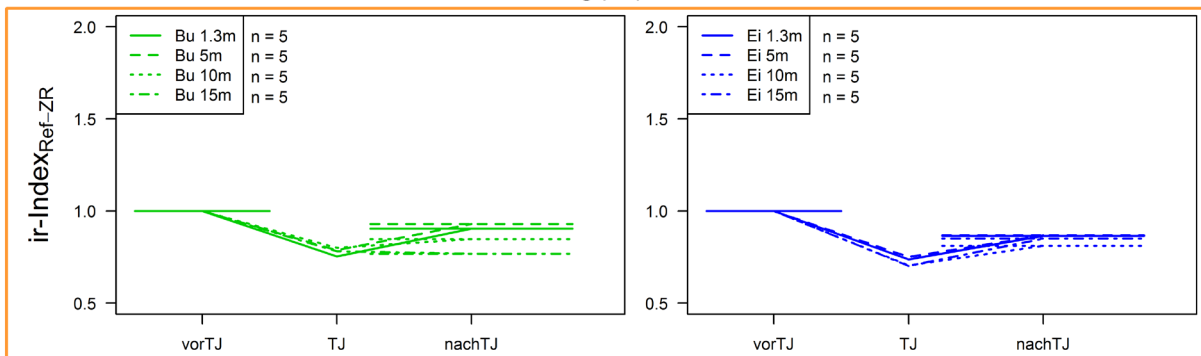


Jungbestände - 2003

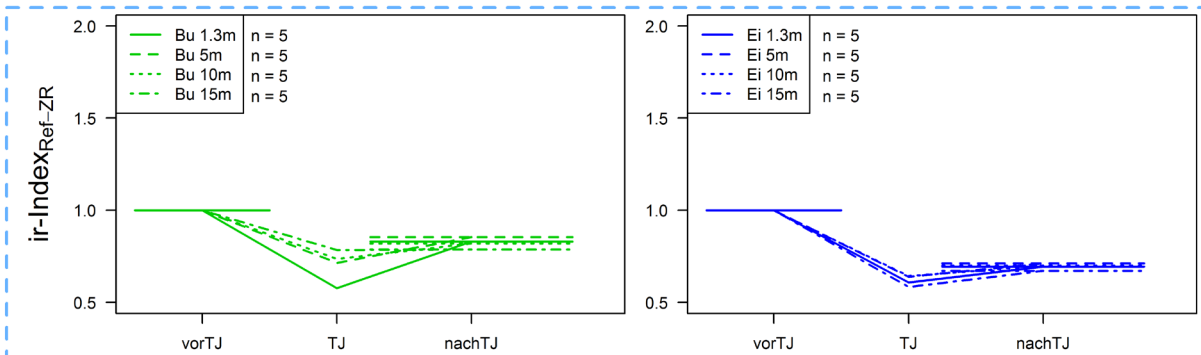
Heuweiler (HW)



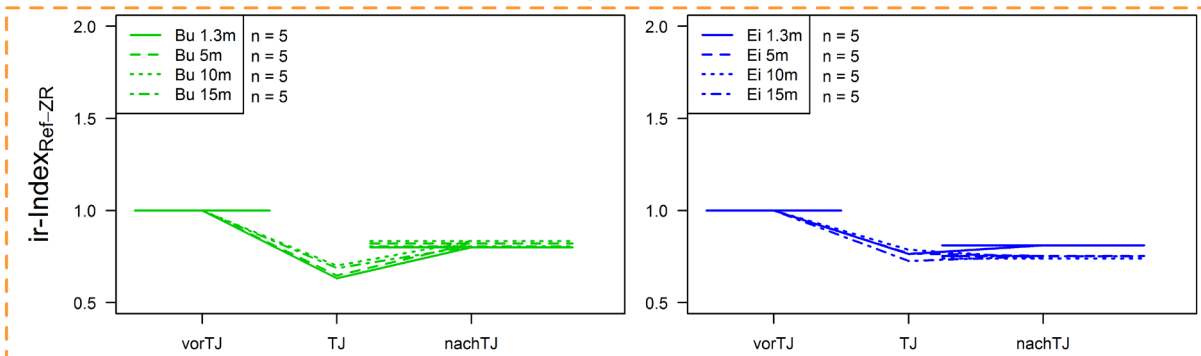
Sulzburg (SU)



Leonbronn (LN)

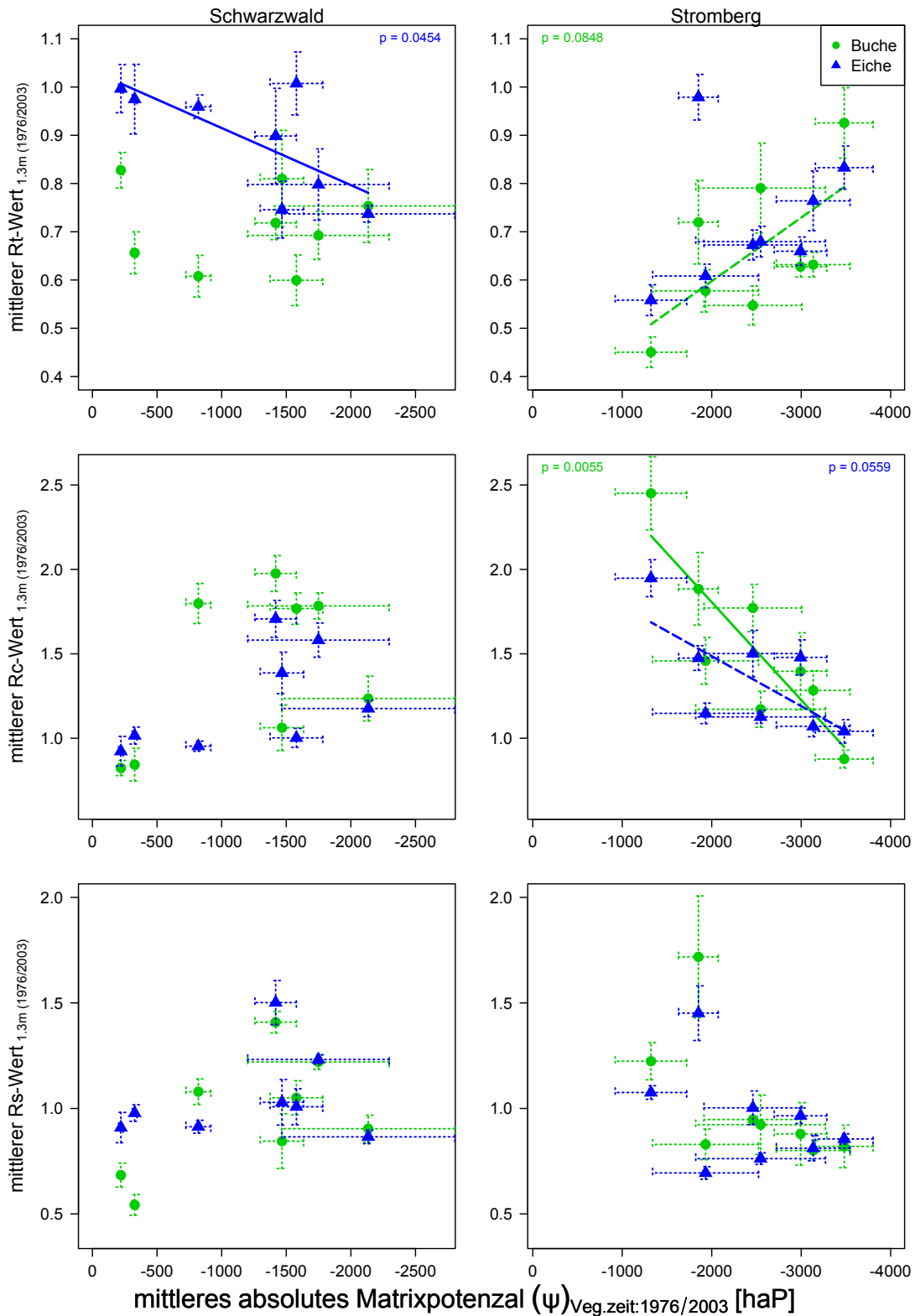


Spielberg (SP)



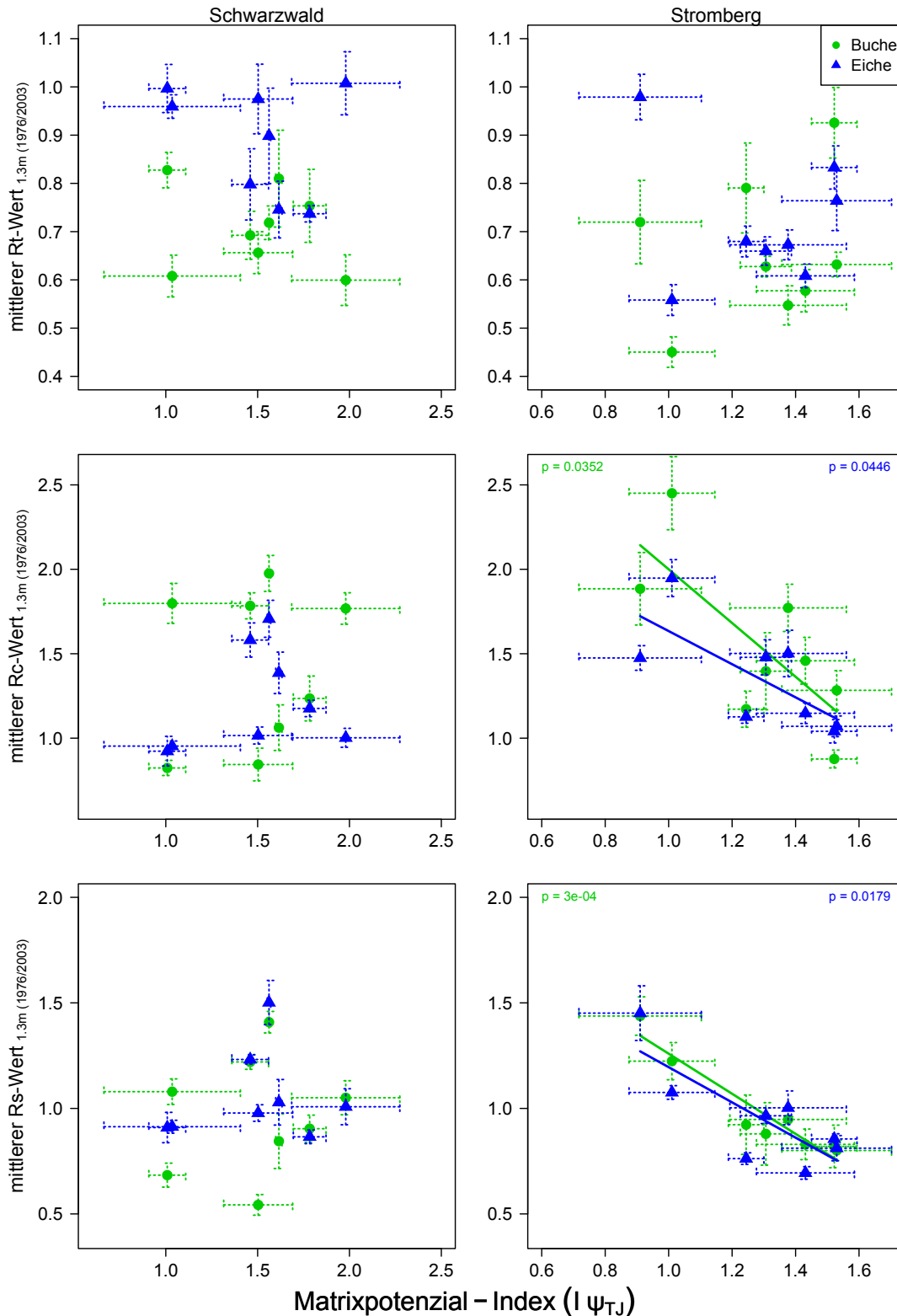
Anhang 15: Trockenstresskennzahlen der Jahre 1976 und 2003 über der mittleren absoluten Matrixpotenzialwerten der Standorte im jeweiligen Trockenjahr, getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart.

Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes in der linken Spalte und im Stromberg in der rechten Spalte dargestellt. Jeder Datenpunkt repräsentiert den aus den Radialzuwachsserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) berechneten Mittelwert der Trockenstresskennzahlen von fünf Einzelbäumen (Richtung der Ordinate) und sechs Zeitreihen des Matrixpotenzials (Richtung der Abszisse). An jedem Datenpunkt ist der jeweilige Standardfehler angegeben. Die Ausgleichsgerade ist als durchgängige Linie eingezeichnet, wenn die lineare Regression signifikante Ergebnisse ergab (p -Wert < 0.05) und als gestrichelte Linie wenn ein schwach signifikanter Trend zu erkennen ist (p -Wert < 0.1).



Anhang 16: Trockenstresskennzahlen der Jahre 1976 und 2003 über dem trockenjahr-spezifischen Matrixpotenzial-Index der Standorte im jeweiligen Trockenjahr, getrennt nach Untersuchungsregionen und Baumart.

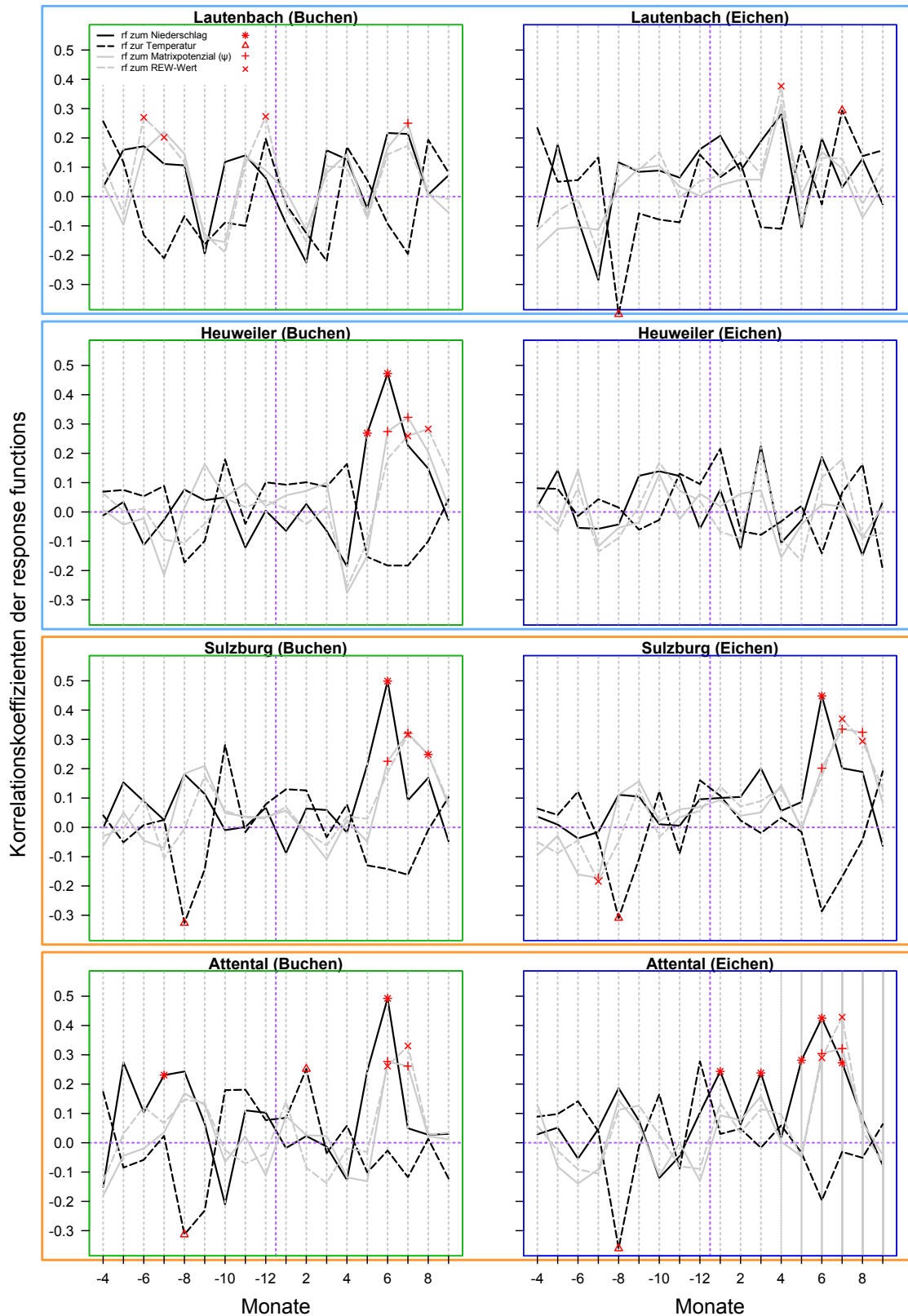
Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes in der linken Spalte und im Stromberg in der rechten Spalte dargestellt. Jeder Datenpunkt repräsentiert den aus den Radialzuwachsserien (Absolutwerte in 1.3 m Höhe) berechneten Mittelwert der Trockenstresskennzahlen von fünf Einzelbäumen (Richtung der Ordinate) und sechs Zeitreihen des Matrixpotenzials (Richtung der Abszisse). Für die Trockenstresskennzahlen ist der jeweilige Standardfehler angegeben. Die Ausgleichsgerade ist als durchgängige Linie eingezeichnet, wenn die lineare Regression signifikante Ergebnisse ergab (p -Wert < 0.05) und als gestrichelte Linie wenn ein schwach signifikanter Trend zu erkennen ist (p -Wert < 0.1).



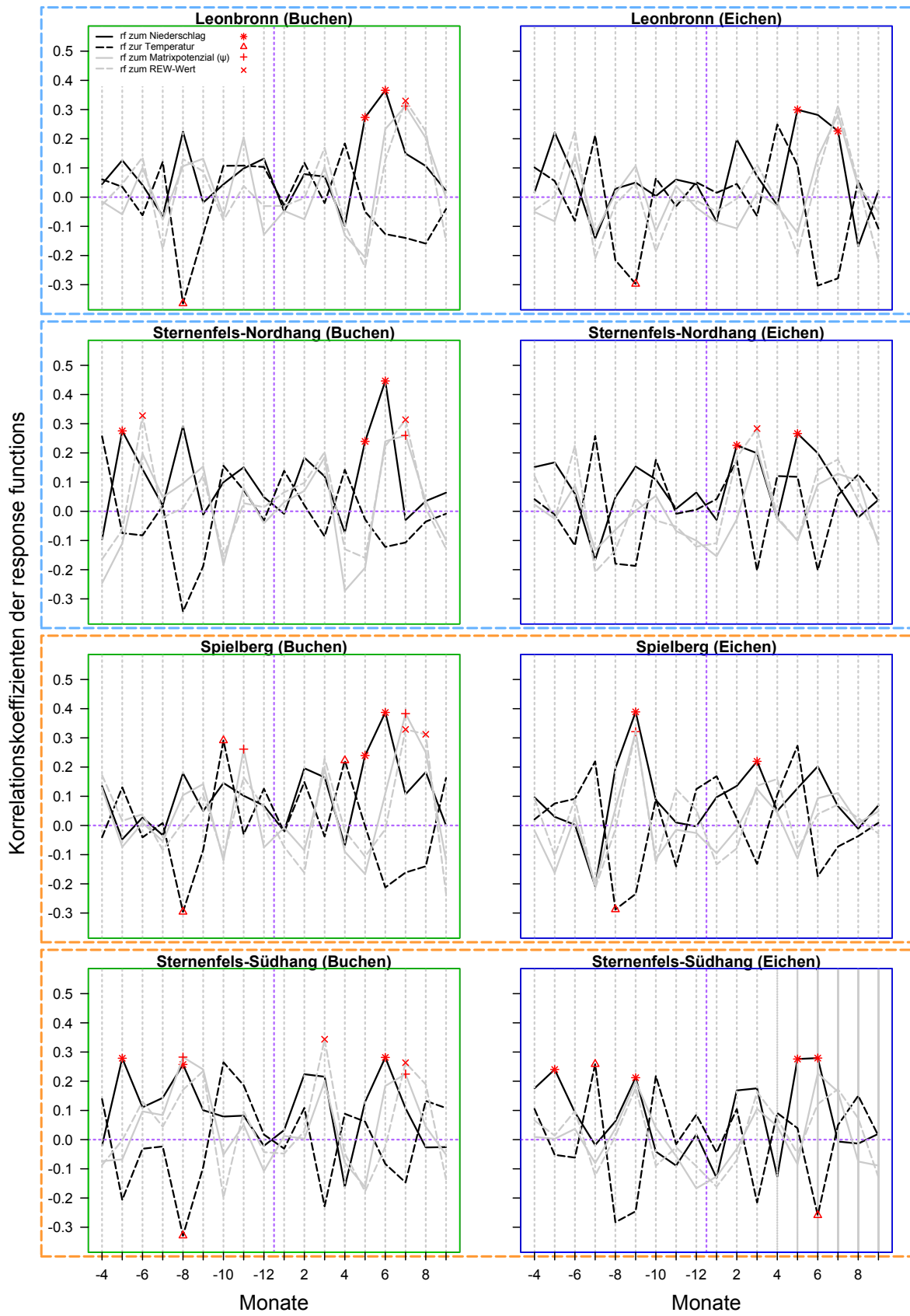
Anhang 17: Koeffizienten der response functions (rf) für alle Untersuchungsstandorte

Dargestellt sind die Koeffizienten der response functions zu den Indexserien der Buchen (linke Spalte) und der Eichen (rechte Spalte). Analysiert wurden die Monatswerte von Niederschlag, Temperatur, Matrixpotenzial (ψ) und relativer Bodenfeuchte (REW-Wert). Gezeigt sind die Koeffizienten der Monate April des Vorjahres (-4) bis September des laufenden Jahres (9) (rote Symbole: signifikante Koeffizienten, $p < 0.05$). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

Schwarzwald



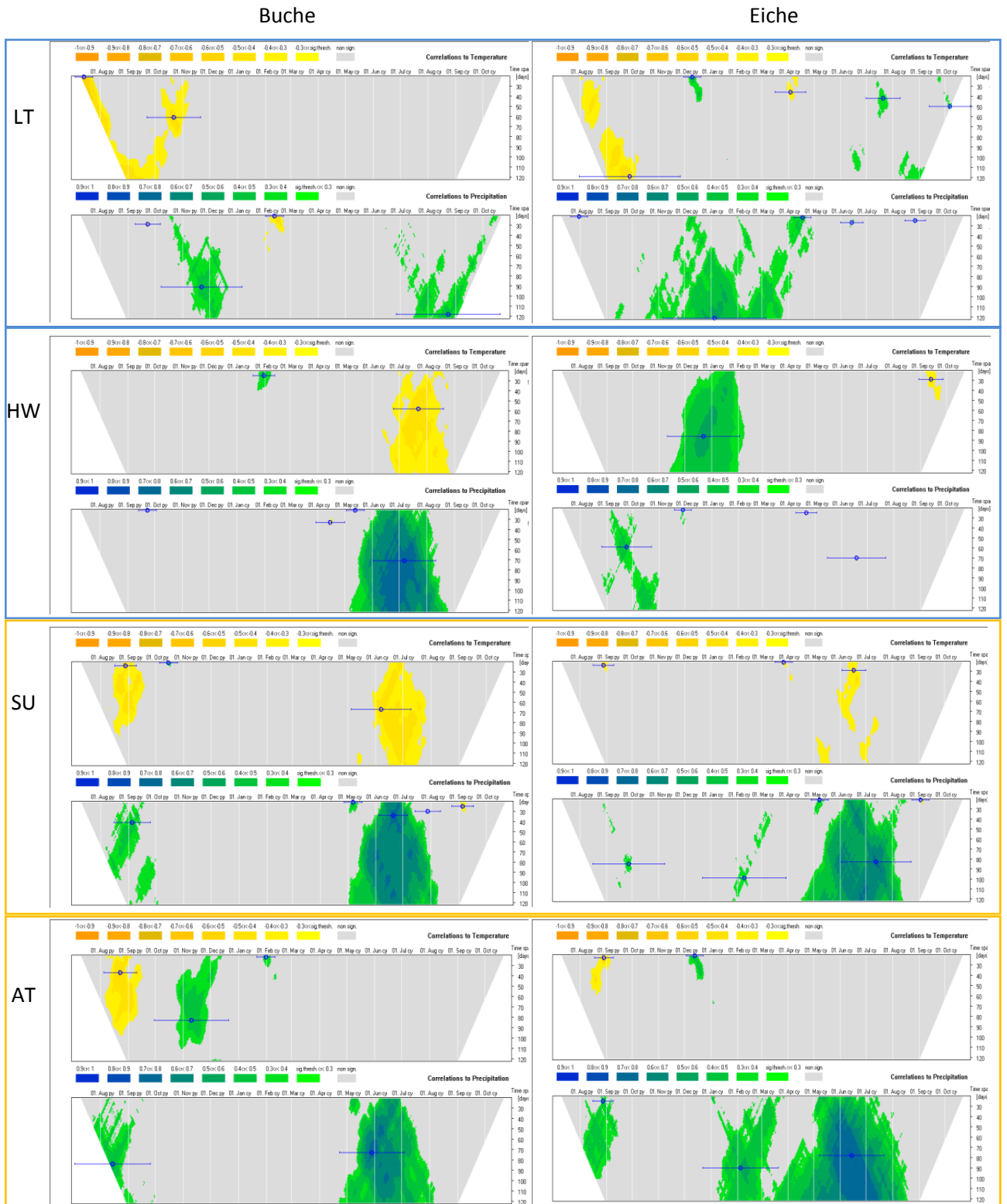
Stromberg



Anhang 18: Korrelationskoeffizienten zwischen den Indexserien der Buchen (linke Spalte) bzw. Eichen (rechte Spalte) und den täglichen Maximaltemperaturen (obere Teilgrafiken) bzw. der täglichen Niederschlagssumme (untere Teilgrafiken) für alle Standorte

Ergebnis der CLIMTREG-Analyse (BECK ET AL. 2013) (Zeitraum 1971 – 2010). Durchgezogene Randlinie: Standorte am Westabfall des Schwarzwaldes, gestrichelte Randlinie: Standorte im Stromberg; hellblaue Randlinie: Nord(ost)hänge, orange Randlinie: Süd(west)hänge.

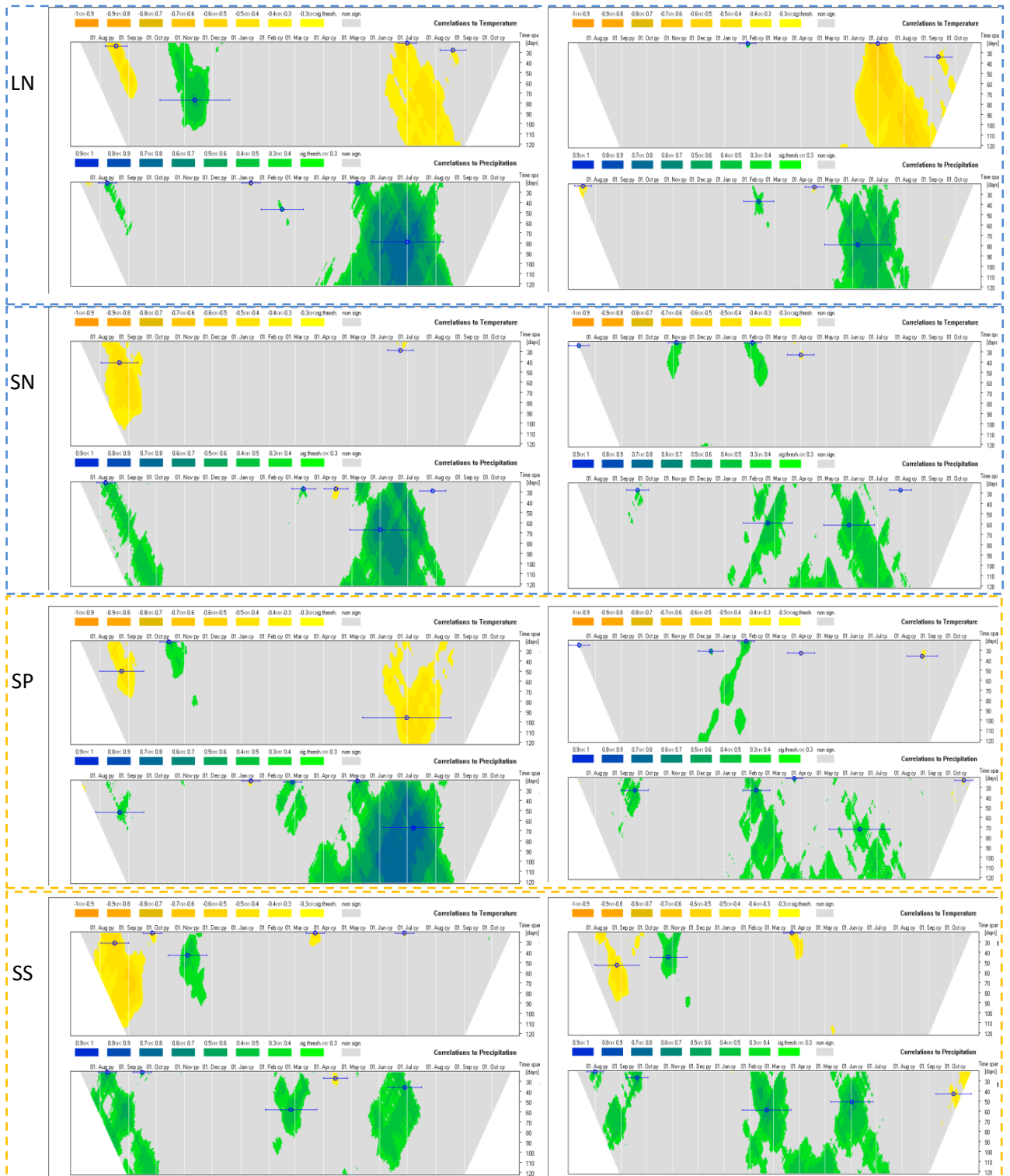
Schwarzwald



Stromberg

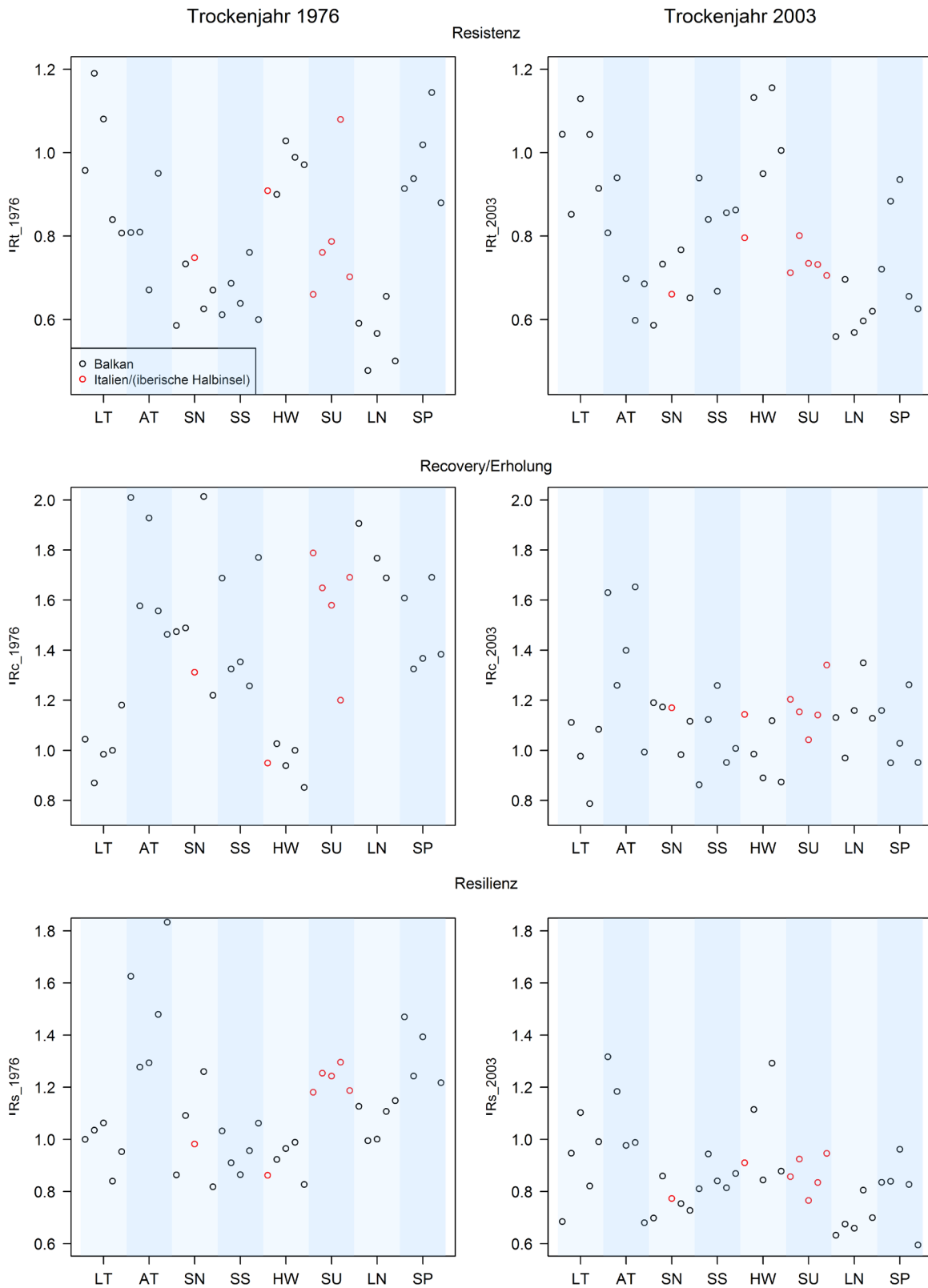
Buche

Eiche



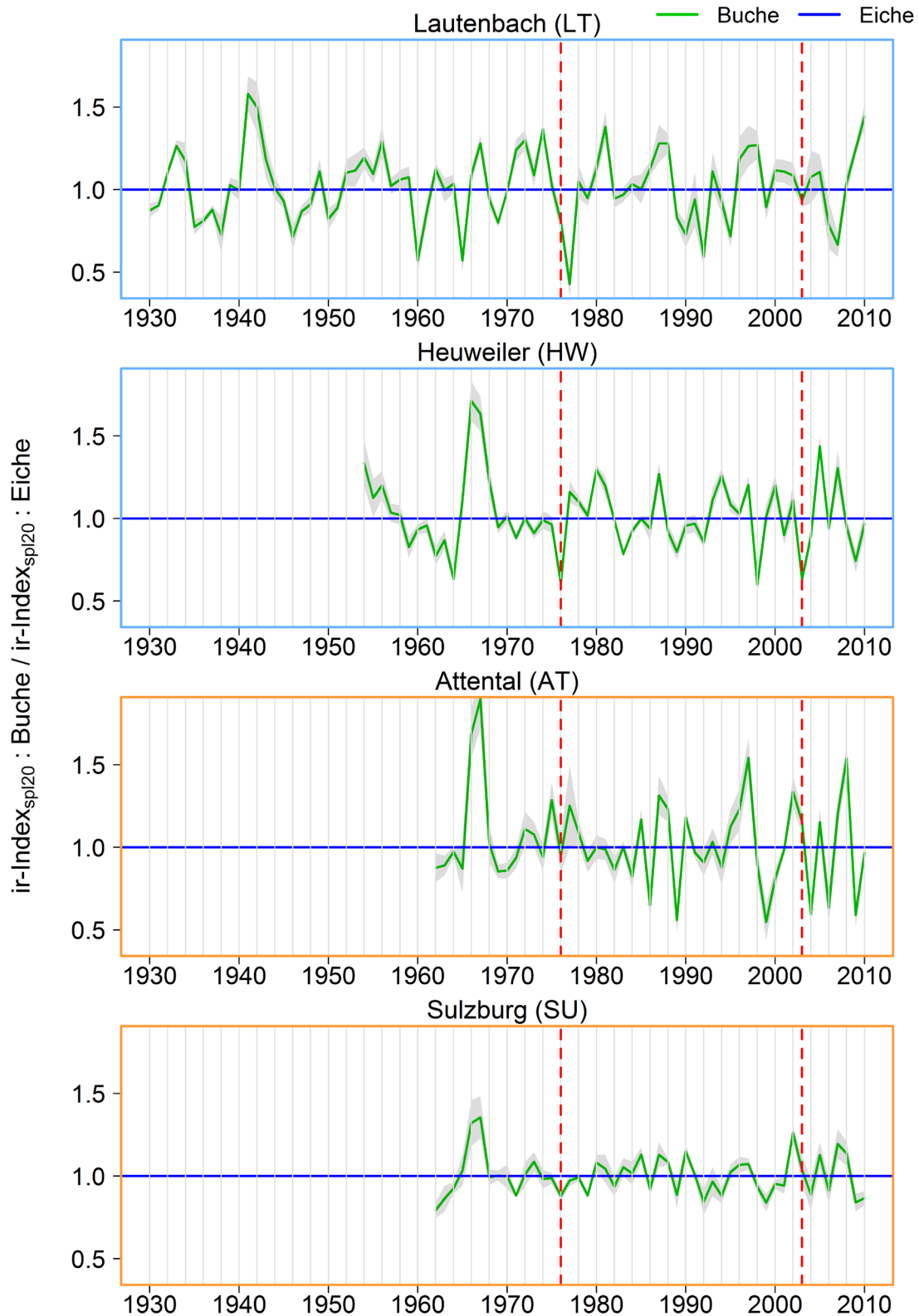
Anhang 19: Trockenstresskennzahlen der untersuchten Eichen – Einzelbäume mit unterschiedlichen eiszeitlichen Refugialgebieten im Vergleich.

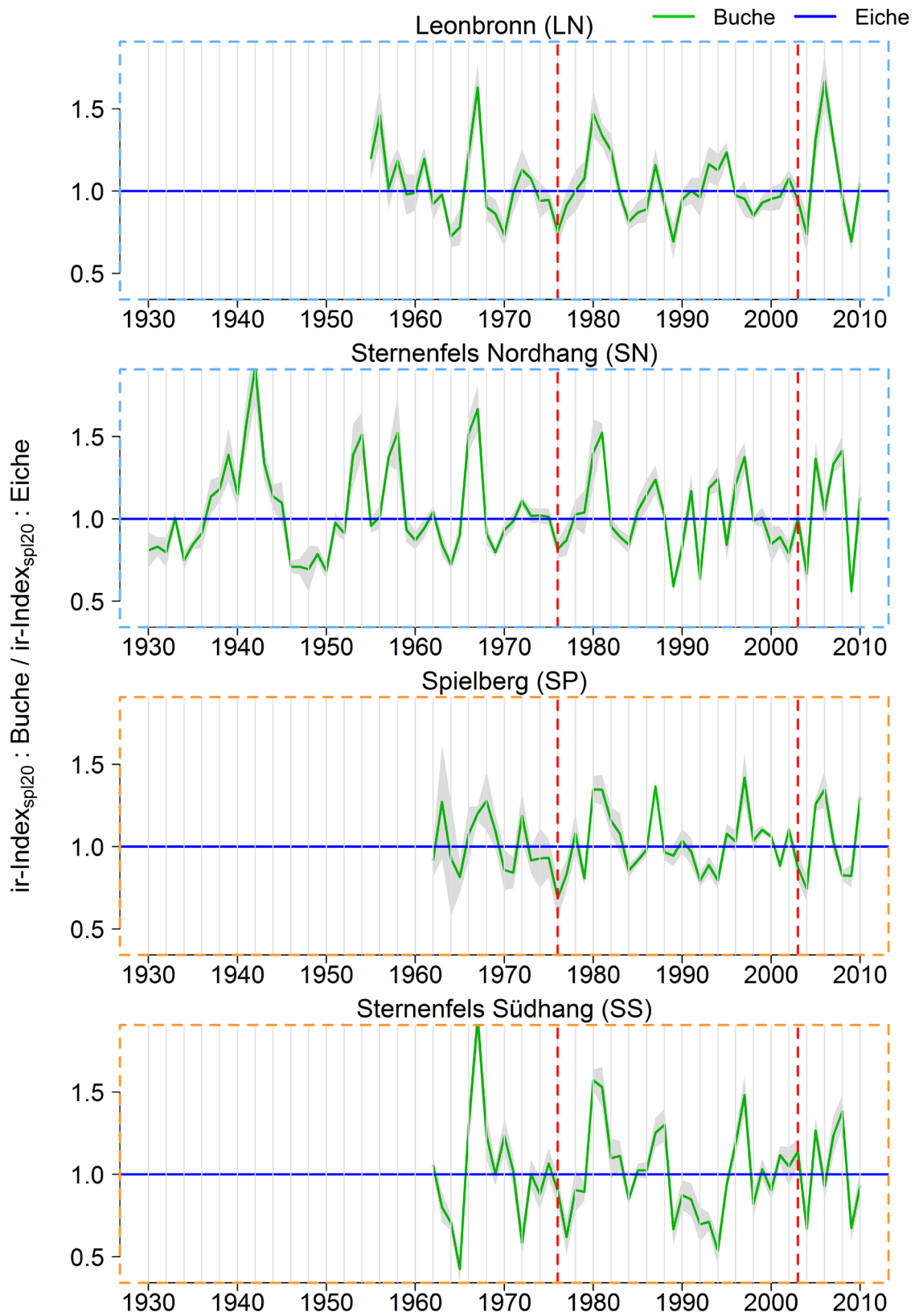
Datengrundlage: Radialzuwachsen BHD-Scheibe, Referenz- und Erholungszeiträume wie in Kapitel 3.4.3.5 dargestellt



Anhang 20: Verlauf des der Quotienten pro Untersuchungsstandort: Indexserien der Buchen dividiert durch die Indexserien der Eichen.

Die zugrunde gelegten Radialzuwachsindizes resultieren aus einer einzelbaumweisen Trendbereinigung der Radialzuwachsreihen auf 1.3 m Höhe mit einem 20jährigen Spline. Pro Baumpaar wurde eine Quotientenreihen berechnet und anschließend der Mittelwert aus den fünf Zeitreihen ermittelt. Die Trockenjahre 1976 und 2003 sind mit vertikalen gestrichelten roten Linien gekennzeichnet. Der graue Hintergrund stellt den Standardfehler dar (n=5).





Anhang

Anhang 21a: Literaturlauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: monatliche Niederschlagssummen und trendbereinigte Radialzuwächse von Buchen

Land	Untersuchungsstandort	Meereshöhe [m]	Autor	Jahresmitteltemperatur (1961-1990) [°C]	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	analysierter Zeitraum
PL	Paris (Fontainebleu)	±130	MICHELOT et al., 2012	11,1					-								+		-	-					1961-2007	
D	Schwarzwald, Attental	426	MATTES, 2014	9,5					-						+										1971-2010	
D	Schwarzwald, Heuweiler	378	MATTES, 2014	9,5																					1971-2010	
GB	Wales (Lady Park Wood)	±120	CAVIN et al., 2013	9,3					-								+								1914-2006	
SLO	Ljubljana (Panaška Reka)	400	CUFAR et al., 2008	9,3								+									-				1960-2006	
D	Schwarzwald, Sulzburg	507	MATTES, 2014	9,3					-																1971-2010	
D	Schwarzwald, Lautenbach	458	MATTES, 2014	9,3																					1971-2010	
D	Stromberg, Leonbronn	332	MATTES, 2014	9,2					-																1971-2010	
D	Stromberg, Sternenfels-Nordhang	257	MATTES, 2014	9,2																					1971-2010	
D	Stromberg, Sternenfels-Südhang	212	MATTES, 2014	9,2					-												+				1971-2010	
D	Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (Eifel)	482	FRIEDRICHS et al., 2010	8,7					-	-									-						1901-2002	
D	Stromberg, Spielberg	390	MATTES, 2014	8,6					-	-	+						+								1971-2010	
D	Hessen (Kellerwald)	336	FRIEDRICHS et al., 2010	8,6					-	-	-						-	+							1901-2002	
D	Mecklenburg-Vorpommern, Westen	±50	SCHARNWEBER et al., 2011	8,3				+	-						+				-						1908-2008	
D	Mecklenburg-Vorpommern, Osten	±25	SCHARNWEBER et al., 2011	8,3					-	-									-	-					1908-2008	
D	Thüringen (Leinefelde)	420-450	SKOMARKOVA et al., 2006	7,9															-	-					1900-2005	
D	Mecklenburg-Vorpommern, Mitte	±90	SCHARNWEBER et al., 2011	7,9					-	-									-	-					1908-2008	
D	Thüringen (Hainich)	445	SKOMARKOVA et al., 2006	7,8																					1900-2005	
S	Südschweden (Skarhult)	±55	DROBYSHEV et al., 2010	7,5					-		+														1950-2006	
S	Südschweden (Floen)	±100	DROBYSHEV et al., 2010	7,5					-		+														1950-2006	
S	Südschweden (Trolleholm)	±95	DROBYSHEV et al., 2010	7,3					-		+														1950-2006	
S	Südschweden (Frodeparken)	±90	DROBYSHEV et al., 2010	7,3					-		+														1950-2006	
D	Baden-Württemberg (Schwäbische Alb, Möhringen)	750	VAN DER MAATEN, 2012	7,0							-	+													1934-1998	
S	Südschweden (Hultabugget)	±60	DROBYSHEV et al., 2010	6,8					-	-	+														1950-2006	
I	Abruzzen (Collelongo)	1560	SKOMARKOVA et al., 2006	6,3 ^{*1}														+							1900-2005	

Meereshöhe: kursiv: Mittelwert mehrerer Standorte, grau: eigene Recherche über Koordinaten-/Kartenangaben und Google Earth

Niederschlag/Temperatur: Mittelwert mehrerer Standorte, grau: eigene Recherche - Datengrundlage: CRU CL 2.0

p4-p12: Vorjahr April bis Vorjahr Dezember, 1-12: Januar bis Dezember im laufenden Jahr, graue Felder: nicht analysierte Monate;

+/-: signifikant positive/negative Korrelation (p=0.05), +/-: signifikant positive/negative "response function" (p=0.05),

(): Korrelation oder "response function" nur für ein Teilkollektiv

*1: Bezugszeitraum: 1951-1998

Anhang 21b: Literaturoauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: mittlere Monatstemperatur und trendbereinigte Radialzuwächse von Buchen

Land	Untersuchungsstandort	Meereshöhe [m]	Autor	Jahresmitteltemperatur (1961-1990) [°C]	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	analysierter Zeitraum
PL	Paris (Fontainebleu)	±130	MICHELOT et al., 2012	11,1					-								+	-	-							1961-2007
D	Schwarzwald, Attental	426	MATTES, 2014	9,5					-						+											1971-2010
D	Schwarzwald, Heuweiler	378	MATTES, 2014	9,5																						1971-2010
GB	Wales (Lady Park Wood)	±120	CAVIN et al., 2013	9,3				-									+									1914-2006
SLO	Ljubljana (Panška Reka)	400	CUFAR et al., 2008	9,3								+									-					1960-2006
D	Schwarzwald, Sulzburg	507	MATTES, 2014	9,3					-																	1971-2010
D	Schwarzwald, Lautenbach	458	MATTES, 2014	9,3																						1971-2010
D	Stromberg, Leonbronn	332	MATTES, 2014	9,2					-																	1971-2010
D	Stromberg, Sternenfels-Nordhang	257	MATTES, 2014	9,2																						1971-2010
D	Stromberg, Sternenfels-Südhang	212	MATTES, 2014	9,2					-													+				1971-2010
D	Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (Eifel)	482	FRIEDRICHS et al., 2010	8,7				-	-	-																1901-2002
D	Stromberg, Spielberg	390	MATTES, 2014	8,6					-		+						+									1971-2010
D	Hessen (Kellerwald)	336	FRIEDRICHS et al., 2010	8,6					-	-	-					-										1901-2002
D	Mecklenburg-Vorpommern, Westen	±50	SCHARNWEBER et al., 2011	8,3				+	-	-	-				+				-	-						1908-2008
D	Mecklenburg-Vorpommern, Osten	±25	SCHARNWEBER et al., 2011	8,3					-	-	-								-	-						1908-2008
D	Thüringen (Leinefelde)	420-450	SKOMARKOVA et al., 2006	7,9																						1900-2005
D	Mecklenburg-Vorpommern, Mitte	±90	SCHARNWEBER et al., 2011	7,9					-	-	-								-	-						1908-2008
D	Thüringen (Hainich)	445	SKOMARKOVA et al., 2006	7,8																						1900-2005
S	Südschweden (Skarhult)	±55	DROBYSHEV et al., 2010	7,5					-		+															1950-2006
S	Südschweden (Floen)	±100	DROBYSHEV et al., 2010	7,5					-	-	+															1950-2006
S	Südschweden (Trolleholm)	±95	DROBYSHEV et al., 2010	7,3						-	+															1950-2006
S	Südschweden (Frodeparken)	±90	DROBYSHEV et al., 2010	7,3						-	+															1950-2006
D	Baden-Württemberg (Schwäbische Alb, Möhringen)	750	VAN DER MAATEN, 2012	7,0							-	+														1934-1998
S	Südschweden (Hultabugget)	±60	DROBYSHEV et al., 2010	6,8					-	-	+															1950-2006
I	Abruzzen (Collelongo)	1560	SKOMARKOVA et al., 2006	6,3 ^{*1}															+							1900-2005

Meereshöhe: kursiv: Mittelwert mehrerer Standorte, grau: eigene Recherche über Koordinaten/-Kartenangaben und Google Earth
 Niederschlag/Temperatur: Mittelwert mehrerer Standorte, grau: eigene Recherche - Datengrundlage: CRU CL 2.0
 p4-p12: Vorjahr April bis Vorjahr Dezember, 1-12: Januar bis Dezember im laufenden Jahr, graue Felder: nicht analysierte Monate;
 +/-: signifikant positive/negative Korrelation (p=0.05), +/-: signifikant positive/negative "response function" (p=0.05),
 (): Korrelation oder "response function" nur für ein Teilkollektiv
 *1: Bezugszeitraum: 1951-1998

Anhang

Anhang 21c: Literaturlauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: monatliche Niederschlagssummen und trendbereinigte Radialzuwächse von Eichen

Land	Untersuchungsstandort	Meereshöhe [m]	Autor	Eichenart	durchschnittliche jährliche Niederschlagssumme [mm]	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	analysierter Zeitraum
CH	Tessin (Cugnasco)	560	FONTI und GARCÍA-GONZÁLEZ, 2008	Qp	1860	*1				+	+	+													1956-2005
D	Schwarzwald, Lautenbach	458	MATTES, 2014	Qp	1385																				1971-2010
CH	Zürich	550	FONTI und GARCÍA-GONZÁLEZ, 2008	Qp	1135	*1								-				+	+	+					1956-2005
D	Schwarzwald, Attental	426	MATTES, 2014	Qp	1116										+		+		+	+	+				1971-2010
D	Schwarzwald, Heuweiler	378	MATTES, 2014	Qp	1098																				1971-2010
D	München (Forstenrieder Park)	±620	ZANG et al., 2011	Qr	1016	*2																			1948-2007
D	Schwarzwald, Sulzburg	507	MATTES, 2014	Qp	1009															+					1971-2010
D	Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (Eifel)	482	FRIEDRICHS et al., 2010	Qp	996													+							1901-2002
D	Stromberg, Spielberg	390	MATTES, 2014	Qp	882						+							+							1971-2010
GB	Wales (Lady park wood)	±120	CAVIN et al., 2013	Qp	803					-											+				1914-2006
D	Stromberg, Leonbronn	332	MATTES, 2014	Qp	786															+		+			1971-2010
D	Stromberg, Sternenfels-Nordhang	257	MATTES, 2014	Qp	777										+					+					1971-2010
D	Stromberg, Sternenfels-Südhang	212	MATTES, 2014	Qp	777			+			+									+	+				1971-2010
D	Hessen (Kellerwald)	336	FRIEDRICHS et al., 2009	Qp	719													+		+	+				1901-2002
RO	Mitte/Süden (Kreis: Prahova, Câmpina)	520	POPA et al., 2013	Qp	678													+			+				1950-2009
EST	Nordosten	±90	SOHAR et al., 2014	Qr	671	*4																			1945-2008
EST	Südosten	±70	SOHAR et al., 2014	Qr	668	*4															+				1945-2008
RO	Süden/Mitte (Kreis: Arges, Mihăești)	500	POPA et al., 2013	Qp	667													+	+	+					1950-2009
D	Sachsen (Dresden, Wald)	±135?	GILLNER et al., 2013	Qp	667	*3					+	+								+	+				1917-2007
D	Sachsen (Dresden, Stadt)	135	GILLNER et al., 2013	Qp	667	*3														+					1917-2007
D	Mecklenburg-Vorpommern, Westen	±50	SCHARNWEBER et al., 2011	Qr	663													+	+	+					1908-2008
PL	Süden (nordöstlich von Krakau, Kraków, K5)	±200	SCHRÖDER et al., 2009; ELMER et al., 2009	Qp	637								+								+	-			1975-2006
F	Paris (Fontainebleau)	±130	MICHELOT et al., 2012	Qp	627						(+)	(+)	+		(+)				+	+	(+)				1961-2007
EST	Westen	±35	SOHAR et al., 2014	Qr	614	*4															+	+	+		1945-2008
CH	Wallis (Salgesch)	880	FONTI und GARCÍA-GONZÁLEZ, 2008	Qpu	604	*1					+					+			+						1956-2005
RO	Mitte/Süden (Kreis: Prahova, Ploiești)	150	POPA et al., 2013	Qr	597										+										1950-2009
RO	Südosten (Kreis: Ilov, bei Bukarest, Ștefănești)	86	POPA et al., 2013	Qr	596										+										1950-2009
D	Mecklenburg-Vorpommern, Mitte	±90	SCHARNWEBER et al., 2011	Qr	595					+	+					+					+	+			1908-2008
D	Brandenburg (K2)	±50	SCHRÖDER et al., 2009; ELMER et al., 2009	Qp	589										-							-			1975-2006
PL	Südwesten (nordöstlich Breslau, Wroclaw, K4)	±150	SCHRÖDER et al., 2009; ELMER et al., 2009	Qp	552										-										1975-2006
PL	Westen (Bezirke: Lubuskie und Wielkopolskie)	±100	ZADWORYN et al., 2014	Qr	547						+										+				1970-2010
D	Mecklenburg-Vorpommern, Osten	±25	SCHARNWEBER et al., 2011	Qr	540										+	+			+	+	+				1908-2008
D	Sachsen-Anhalt (K1)	±30	SCHRÖDER et al., 2009; ELMER et al., 2009	Qp	531										+	+		+	+	+			+		1975-2006
D	Brandenburg (K3)	±41	SCHRÖDER et al., 2009; ELMER et al., 2009	Qp	521										+						+				1975-2006

Qp: Quercus petraea, Qr: Quercus robur, Qpu: Quercus pubescens;
 Meereshöhe: kursiv: Mittelwert mehrerer Standorte, grau: eigene Recherche über Koordinaten-/Kartenangaben und Google Earth
 Niederschlag/Temperatur: Mittelwert mehrerer Standorte, grau: eigene Recherche - Datengrundlage in der Regel: CRU CL 2.0
 p4-p12: Vorjahr April bis Vorjahr Dezember, 1-12: Januar bis Dezember im laufenden Jahr, graue Felder: nicht analysierte Monate;
 +/-: signifikant positive/negative Korrelation (p=0.05), +/-: signifikant positive/negative "response function" (p=0.05),
 (): Korrelation oder "response function" nur für ein Teilkollektiv
 *1: Bezugszeitraum jeweils: 1958-2006, Wetterstation Locarno für Cugnasco: 239m, Wetterstation Sion für Salgesch: 549m
 *2: Bezugszeitraum: 1970-2007
 *3: Daten der meteorologische Station: Dresden-Klotz
 *4: gemittelte Werte der entsprechenden Wetterstationen, verfügbar unter: <http://www.emhi.ee/index.php?ide=6,177,178,184>

Anhang 21d: Literaturoauswertung und eigene Analysen: Klima-Wachstumsbeziehung: mittlere Monatstemperatur und trendbereinigte Radialzuwächse von Eichen

Land	Untersuchungsstandort	Meereshöhe [m]	Autor	Eichenart	Jahresmitteltemperatur (1961-1990) [°C]	p4	p5	p6	p7	p8	p9	p10	p11	p12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	analysierter Zeitraum
CH	Tessin (Cugnasco)	560	FONTI und GARCÍA-GONZÁLEZ, 2008	Qp	12,0 *1					-						+				-	-			+	1956-2005
RO	Südosten (Kreis: Ilov, bei Bukarest, Stefănești)	86	POPA et al., 2013	Qr	11,1															-	-				1950-2009
F	Paris (Fontainebleu)	±130	MICHELOT et al., 2012	Qp	11,1					(-)	(-)				(-)					(-)	(-)				1961-2007
RO	Mitte/Süden (Kreis: Prahova, Ploiești)	150	POPA et al., 2013	Qr	10,5											-									1950-2009
CH	Wallis (Salgesch)	880	FONTI und GARCÍA-GONZÁLEZ, 2008	Qpu	9,6 *1																				1956-2005
D	Schwarzwald, Attental	426	MATTES, 2014	Qp	9,5					-															1971-2010
D	Schwarzwald, Heuweiler	378	MATTES, 2014	Qp	9,5																				1971-2010
GB	Wales (Lady park wood)	±120	CAVIN et al., 2013	Qp	9,3										-	-									1914-2006
D	Schwarzwald, Sulzburg	507	MATTES, 2014	Qp	9,3					-															1971-2010
D	Schwarzwald, Lautenbach	458	MATTES, 2014	Qp	9,3					-												+			1971-2010
D	Stromberg, Leonbronn	332	MATTES, 2014	Qp	9,2						-														1971-2010
D	Stromberg, Sternenfels-Nordhang	257	MATTES, 2014	Qp	9,2																				1971-2010
D	Stromberg, Sternenfels-Südhang	212	MATTES, 2014	Qp	9,2					+											-				1971-2010
RO	Süden/Mitte (Kreis: Argeș, Mihăești)	500	POPA et al., 2013	Qp	9,1															-					1950-2009
CH	Zürich	550	FONTI und GARCÍA-GONZÁLEZ, 2008	Qp	9,0 *1													-	-	-					1956-2005
D	Sachsen (Dresden, Wald)	±135?	GILLNER et al., 2013	Qp	8,9 *3						-									-	-				1917-2007
D	Sachsen (Dresden, Stadt)	135	GILLNER et al., 2013	Qp	8,9 *3										+	+									1917-2007
RO	Mitte/Süden (Kreis: Prahova, Cămpina)	520	POPA et al., 2013	Qp	8,9															-					1950-2009
D	München (Forstnieder Park)	±620	ZANG et al., 2011	Qr	8,8 *2																				1948-2007
D	Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (Eifel)	482	FRIEDRICH et al., 2010	Qp	8,7																				1901-2002
D	Hessen (Kellerwald)	336	FRIEDRICH et al., 2009	Qp	8,6											+					-				1901-2002
D	Stromberg, Spielberg	390	MATTES, 2014	Qp	8,6					-															1971-2010
D	Mecklenburg-Vorpommern, Westen	±50	SCHARNWEBER et al., 2011	Qr	8,3																				1908-2008
D	Mecklenburg-Vorpommern, Osten	±25	SCHARNWEBER et al., 2011	Qr	8,3					-	-										-				1908-2008
D	Mecklenburg-Vorpommern, Mitte	±90	SCHARNWEBER et al., 2011	Qr	7,9			-	-	-	-	+													1908-2008
EST	Westen	±35	SOHAR et al., 2014	Qr	5,8 *4																				1945-2008
EST	Südosten	±70	SOHAR et al., 2014	Qr	5,1 *4																	+			1945-2008
EST	Nordosten	±90	SOHAR et al., 2014	Qr	4,4 *4					-											+				1945-2008

Qp: Quercus petraea, Qr: Quercus robur, Qpu: Quercus pubescens;
 Meereshöhe: kursiv: Mittelwert mehrerer Standorte, grau: eigene Recherche über Koordinaten/-Kartenangaben und Google Earth
 Niederschlag/Temperatur: Mittelwert mehrer Standorte, grau: eigene Recherche - Datengrundlage in der Regel: CRU CL 2.0
 p4-p12: Vorjahr April bis Vorjahr Dezember, 1-12: Januar bis Dezember im laufenden Jahr, graue Felder: nicht analysierte Monate;
 +/-: signifikant positive/negative Korrelation (p=0.05), +/-: signifikant positive/negative "response function" (p=0.05),
 (): Korrelation oder "response function" nur für ein Teilkollektiv
 *1: Bezugszeitraum jeweils: 1958-2006, Wetterstation Locarno für Cugnasco: 239m, Wetterstation Sion für Salgesch: 549m
 *2: Bezugszeitraum: 1970-2007
 *3: Daten der meteorologische Station: Dresden-Klotz
 *4: gemittelte Werte der entsprechenden Wetterstationen, verfügbar unter: <http://www.emhi.ee/index.php?ide=6,177,178,184>

