

Zum Einfluss der Witterung auf Wuchsverhalten
und Vitalität der Trauben-Eiche
(*Quercus petraea* [MATT.] LIEBL.)

Habilitationsschrift

zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum silvaticarum habitatus (Dr. rer. silv. habil.)

vorgelegt der Fakultät für Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Dresden

von Dr. rer. silv. Jens Schröder
geboren am 21.06.1968 in Königs Wusterhausen

Berlin, 28.02.2013

*Look abroad through nature's range
Nature's mighty law is change.*

- Robert Burns

Dank

Die folgende Arbeit ist das Ergebnis intensiver Auseinandersetzung mit den Themen Waldwachstum, Dendroökologie und Vitalität über die vergangenen fünf bis zehn Jahre hinweg. Ihre tieferen Wurzeln sind Fragen, die sich in mir seit Beginn meiner beruflichen Ausbildung durch ausgezeichnete Lehrer, durch Kolleginnen und Kollegen sowie durch anregende Literatur geformt haben. Sie konnte außerdem nur entstehen, weil mir die Zeit und der Raum zur Verfügung standen, mein Interesse an diesen Themen kontinuierlich weiter zu verfolgen. Für das Zusammentreffen all dieser Voraussetzungen bin ich vielen Menschen zu großem Dank verpflichtet. In der zeitlichen Abfolge sind das zuerst Pat Kruse, Prof. Hans-Jürgen Otto und Prof. Günther Wenk, die mir in meiner Lehrzeit und während des Studiums sowohl Handwerkszeug als auch Begeisterung für die Beschäftigung mit dem Wald und seinen Lebensprozessen vermittelt haben. Dr. Kristian Münder danke ich dafür, mich als Freund und Kollege seit langem zu begleiten und zu unterstützen. Herzlicher Dank gebührt ebenso Dr. Dorothea Gerold, die mir seit meinen ersten wissenschaftlichen Schritten immer wieder mit Rat und Tat zur Seite stand. Bei Alexa Michel, Christian Marquardt, Marcus Lange und Nicole Linke bedanke ich mich für die vielfältige Hilfe im Entstehungsprozess dieser Arbeit. Für ihren persönlichen Zuspruch und vielfältige inhaltliche Anregungen möchte ich besonders Dr. Annett Degenhardt und Dr. Wolfgang Beck danken. Viele andere Kolleginnen und Kollegen an der Fachrichtung Forstwissenschaft der TU Dresden sowie am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde haben in verschiedenster Form meine Arbeit unterstützt, auch ihnen danke ich ganz herzlich. Bei Prof. Christian Ammer möchte ich mich besonders bedanken dafür, dass er bereit war, als Gutachter zu fungieren.

Dass ich diese Schrift begonnen und auch zu Ende gebracht habe, verdanke ich vor allem drei Personen, die mich als Lehrer gefördert und als Vorbilder inspiriert haben. In ganz besonderem Maße ist das Prof. Heinz Röhle, der bereits Betreuer meiner Promotion war. Er hat mich immer wieder durch Vertrauen, Anerkennung und produktive Kritik in meinen Zielen bestärkt – dafür meinen aufrichtigen Dank. Ebenso bedanke ich mich bei Prof. Martin Guericke, der es mir ermöglicht hat, Lehrerfahrungen zu sammeln, und mir die Freiheit gab, mein Projekt neben allen anderen Verpflichtungen fertigzustellen. Prof. Ralf Kätzel hat durch seine begeisternde Art des wissenschaftlichen Arbeitens und sein großes Interesse wesentlichen Anteil an Gestalt und Fokus dieser Arbeit – auch ihm danke ich ganz herzlich für sein Vertrauen und seine vielfältige Hilfe.

Lehrerinnen und Lehrer, Kolleginnen und Kollegen haben mir geholfen, beruflich und wissenschaftlich Schritt für Schritt voranzukommen. Auf vielen anderen Ebenen haben mich meine Eltern dabei von Anfang an begleitet und unterstützt, denen ich dafür ausdrücklich danken möchte. Schließlich – und nicht zuletzt – bedanke ich mich von Herzen bei meiner Frau Sabine Tietjen, durch deren gründliche Korrektur diese Arbeit ging, und bei meinen Jungs für ihre unendliche Geduld und ihren bestärkenden Zuspruch.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Untersuchungsansatz.....	1
1.1	Waldnutzung im Klimawandel.....	1
1.2	Die Trauben-Eiche in Brandenburg: Sorgenkind oder Hoffnungsträger?	3
1.3	Ziele und Forschungsfragen	4
2	Hintergrund: Wachstum und Vitalität der Trauben-Eiche.....	6
2.1	Geschichtlicher Hintergrund und aktuelle Probleme.....	6
2.1.1	Bedeutung der Trauben-Eiche in Gegenwart und Zukunft.....	8
2.1.2	Das Phänomen des "Eichensterbens"	9
2.1.3	Erklärungsansätze für die Vitalitätsprobleme	10
2.2	Theoretische Basis.....	14
2.2.1	Begriffsbestimmungen: Wachstum und Vitalität	14
2.2.2	Störungen, Stress und Krankheiten	17
2.2.3	Anpassung und Stabilität.....	22
2.2.4	Soziale Interaktionen.....	25
2.2.5	Beziehungen zwischen Wachstum und Vitalität: " <i>growth or defense</i> "	28
2.2.6	Wachstumssteigernde vs. wachstumshemmende Umwelteinflüsse.....	32
2.2.7	Das Konzept der "Vulnerabilität"	35
2.3	Dendroökologische Analysen der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen	37
2.3.1	Gegenstand der Dendroökologie	37
2.3.2	Unsicherheit und Emergenz	40
2.3.3	Quantifizierung von Witterungs-Zuwachs-Beziehungen	41
2.3.4	Zeitliche Skalenebenen bei der Analyse des Witterungs-Zuwachs-Systems ...	47
2.4	Klimawandel und Waldumbau.....	50
2.4.1	Klima und Witterung	50
2.4.2	Veränderungen des Klimas und Reaktionen der Baumarten	50
2.4.3	Waldumbau als Risikominimierung	55
2.5	Präzisierung des Zielsystems	57
3	Material und Methoden	59
3.1	Datenbasis	59
3.1.1	Versuchsflächen.....	59
3.1.2	Klimatische Einordnung der Flächen.....	63
3.1.3	Bestandesgeschichte	64
3.1.4	Verteilung auf soziale Gruppen, Stammzahlen und Flächengrößen.....	66
3.2	Methodik der Vitalitätseinschätzung	67
3.2.1	Kronenstruktur.....	68
3.2.2	Belaubungszustand	69
3.2.3	Beziehungen zwischen den Vitalitätsindikatoren	70
3.3	Zuwachsquantifizierung und dendrochronologische Methodik	70
3.3.1	Probenahme von Bohrkernen und Datenaufbereitung.....	72
3.3.2	Parameter zur Beurteilung der Zeitreihen.....	79
3.3.3	Weiserjahre	82
3.4	Analyse der Beziehungen zwischen Witterung, Zuwachs und Vitalität.....	85
3.4.1	Ableitung von Witterungsparametern für Vergangenheit und Zukunft	85
3.4.2	Die Analyseprogramme "CLIMTREG" und "bootRes"	89
3.4.3	Witterungswirkungen auf den Zuwachs.....	94
3.4.4	Beziehungen zwischen Vitalität, Zuwachs und Kronengröße.....	96

4	Ergebnisse	98
4.1	Vitalität	98
4.1.1	Belaubungszustand und Kronenstruktur	98
4.1.2	Beziehungen zwischen Kronenzustand, Zuwachs und Kronengröße.....	101
4.1.3	Mortalität	103
4.2	Zuwachsverhalten	105
4.2.1	Evaluierung der Stichprobenzahlen, Zeit- und Altersspannen.....	105
4.2.2	Durchmesserentwicklung und Jahrringbreiten	106
4.2.3	Periodischer Radial- und Kreisflächenzuwachs.....	109
4.2.4	Autokorrelation und Sensitivität der Jahrringbreiten-Zeitreihen	111
4.2.5	Jahrringindex-Zeitreihen: Darstellung und Eigenschaften	120
4.2.6	Weiserjahre	126
4.3	Quantifizierung der Witterungswirkungen auf den Zuwachs.....	131
4.3.1	Witterungsverlauf auf den Versuchsflächen.....	131
4.3.2	Beziehungen zwischen Witterungs-Jahreswerten und Jahrringbreiten	134
4.3.3	Beziehungen zwischen Witterungs-Monatswerten und Jahrringbreiten.....	136
4.3.4	Wirkungen tagesaufgelöster Witterungsparameter auf die Jahrringbreiten .	145
4.4	Ergebnisüberblick	154
5	Diskussion	161
5.1	Datengrundlage und Methoden	161
5.1.1	Klimawandel im Untersuchungsgebiet.....	161
5.1.2	Dendroökologische Methodik	167
5.1.3	Versuchsflächen und Wuchsverhalten	169
5.2	Diskussion der Kernfragen	173
5.2.1	Vitalität und Kronenzustand.....	173
5.2.2	Beziehungen zwischen Witterung und Wuchsverhalten	182
5.2.3	Schlussfolgerungen für die Zukunft der Trauben-Eiche in Brandenburg	193
5.3	Ausblick	204
5.3.1	Klimawandelforschung und Risikomanagement	204
5.3.2	Methodische Anregungen	206
5.3.3	Sorgenkind oder Hoffnungsträger?.....	208
6	Zusammenfassung	211
7	Literatur	225
8	Anhang	244

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Größe der von Trauben-Eiche in verschiedenen Altersstufen bestockten Waldflächen in Brandenburg zum 01.01.2007 nach Abfrage des Datenspeichers Wald	3
Abb. 2-2: Mittlere Laubverlustprozente nach den jährlichen Waldzustandserhebungen in Brandenburg und Berlin für die wichtigsten Baumarten(gruppen) seit 1991	10
Abb. 2-3: Darstellung des Wirkens der wichtigsten Schadfaktoren, die zum Eichensterben beitragen	12
Abb. 2-4: Theoretische Beziehungen zwischen hydraulic failure und carbon starvation	13
Abb. 2-5: Modell möglicher Reaktionen eines Organismus auf Stresseinwirkung	19
Abb. 2-6: Verlaufsspirale von Komplexkrankheiten	21
Abb. 2-7: Mögliche Reaktionen eines Systems auf sich verändernde Bedingungen	23
Abb. 2-8: Folgen hoher Konkurrenzkraft einer Art bzw. eines Individuums	26
Abb. 2-9: Beziehungen zwischen Nettoassimilation, relativem Volumenzuwachs und Sekundärstoffwechsel	29
Abb. 2-10: Bezugssystem von Vulnerabilitätsanalysen	36
Abb. 2-11: Wirkungsgefüge zwischen geringen Niederschlägen, hohen Temperaturen und der Bildung schmaler Jahrringe bei Bäumen	43
Abb. 2-12: Schema der Informationsaufbereitung für dendroökologische Untersuchungen	46
Abb. 2-13: IPCC-Szenarien der zukünftigen sozio-ökonomischen Entwicklung	52
Abb. 2-14: Klimahülle für <i>Quercus petraea</i> (MATT.) LIEBL. nach KÖLLING & ZIMMERMANN (2007)	54
Abb. 3-15: Lage der Kern- und Zusatz-Versuchsflächen	60
Abb. 3-16: Beispiele für Schätzhilfen zur Einstufung der Kronenstruktur (KS) von Alteichen.....	68
Abb. 3-17: Vorgehen bei der Schätzung der Kronenverlichtung nach Methodik der Waldzustandserhebung ...	69
Abb. 3-18: Beispiel für die Organisation der Probenahme von Bohrkernen auf den Versuchsflächen	73
Abb. 3-19: Berechnung des Restradius von Bohrkernen zur Standardisierung der Jahrringbreiten	75
Abb. 3-20: Vorgehen zur Erzeugung standardisierter Einzelbaum-Zeitreihen aus Jahrringmessreihen	75
Abb. 3-21: Datenbereinigung ("Ausreißerprüfung") zur Bildung bestandes- und baumartspezifisch repräsentativer Stichproben anhand der Entwicklung des relativen BHD	77
Abb. 3-22: Ablauf der Datenaufbereitung (<i>pre-whitening</i>) am Beispiel eines Probebaumes	78
Abb. 3-23: Autoregressive (AR(1)) Modellierung als zweiter Schritt der baumindividuellen Indexbildung	78
Abb. 3-24: Weiserjahrdefinition auf Basis der jährlichen Häufigkeitsverteilungen der baumindividuellen Jahrringindex-Werte	83
Abb. 3-25: Beispiel für die Identifikation von Weiserjahren anhand der Jahrringindex-Werte	83
Abb. 3-26: Klimastationen des DWD, die zur Herleitung eines mittleren Witterungsverlaufs herangezogen wurden ("Referenzstationen") und Lage der Versuchsflächen.....	88
Abb. 3-27: Screenshot aus Teil 1 des Softwarepakets CLIMTREG	91
Abb. 3-28: Sensitivität eines von CLIMTREG aufgestellten Modells für die Witterungs-Zuwachs-Beziehung ..	92
Abb. 3-29: Beispiel der Ergebnisausgabe durch das R-Paket "bootRes"	93
Abb. 3-30: Response-Koeffizienten der Beziehungen zwischen Monatsmitteltemperaturen vom April des Vorjahres bis zum September des Wuchsjahres und Jahrringindex	94
Abb. 4-31: Verteilung der prozentualen Laubverluste auf den Versuchsflächen des Kontinentalitätsgradienten vom Beginn (2006) bis zum Ende der Aufnahmen (2010 beziehungsweise 2008)	98
Abb. 4-32: Verteilung der Kronenstrukturstufen auf den Versuchsflächen des Kontinentalitätsgradienten vom Beginn (2006) bis zum Ende der Aufnahmen (2010)	99
Abb. 4-33: Histogramme der Anspruchswerte zum prozentualen Laubverlust auf den Flächen K1-K5 2008. ...	100
Abb. 4-34: Verteilung der Kronenstrukturstufen KS nach KÖRVER et al. (1999) auf den Zusatzflächen	101
Abb. 4-35: Beziehung zwischen Laubverlust und Kronenstrukturstufe als Mittelwerte der Jahre 2006-2008 für die Trauben-Eichen des herrschenden Bestands auf den Klimasequenzflächen (n = 641)	102
Abb. 4-36: Beziehung zwischen relativer Kronenschirmfläche und dem prozentualen Laubverlust sowie der Kronenstrukturstufe als Mittelwerte der Jahre 2006-2008	103
Abb. 4-37: Partielle Korrelation zwischen Kronenschirmfläche und jährlichem Kreisflächenzuwachs	103
Abb. 4-38: Stichprobenzahlen bei der Bohrkernentnahme und weiteren Auswertung des Radialzuwachses	105
Abb. 4-39: Anzahl der im Untersuchungszeitraum zur Verfügung stehenden Bestandes-Chronologien	106

Abb. 4-40: Jährlicher Radialzuwachs und Entwicklung des BHD über der Zeit für die Flächen K1 bis K5 im Vergleich mit dem Grundflächenmittelstamm des verbleibenden Bestandes nach der Ertragstafel	107
Abb. 4-41: Entwicklung des jährlichen Radialzuwachses und des Brusthöhendurchmessers über dem Alter für Trauben-Eiche auf 20 Zusatzflächen	108
Abb. 4-42: Jahrringbreitenentwicklung auf den Kern- und den Zusatzflächen	109
Abb. 4-43: Beziehungen zwischen Ausgangskreisfläche mit Rinde und mittlerem jährlichem Kreisflächenzuwachs	110
Abb. 4-44: Autokorrelationskoeffizienten (ACF) für die Zeitreihen der Jahrringbreite von den Kernflächen, getrennt nach Sozialklassen, dargestellt für <i>Lags</i> (Zeitverschiebungen) von 0 bis 20 Jahren	112
Abb. 4-45: Verteilung der Autokorrelation erster Ordnung über gleitende 21-Jahres-Intervalle für die Kernflächen	113
Abb. 4-46: Verteilung der Autokorrelation erster Ordnung über gleitende 21-Jahres-Zeiträume für die Zusatzflächen	113
Abb. 4-47: Verlauf der Autokorrelation erster Ordnung über gleitende 21-Jahres-Zeiträume für die Zusatzflächen	114
Abb. 4-48: Sensitivität der Jahrringbreiten-Zeitreihen der Kernflächen	115
Abb. 4-49: Verteilung der Werte für die jährliche Sensitivität in den Zeitreihen der Jahrringbreite für die Zusatzflächen	116
Abb. 4-50: Verlauf der jährlichen Sensitivität in den Zeitreihen der Jahrringbreite für die Zusatzflächen	116
Abb. 4-51: Zeitlicher Verlauf der mittleren Autokorrelation erster Ordnung und Sensitivität in den Jahrringbreiten-Zeitreihen für die Kernflächen und die Zusatzflächen	117
Abb. 4-52: Verschiebung der Mittelwerte von Autorrelation erster Ordnung und Sensitivität von der Periode 1900-1980 zur Periode 1981-2006 auf den Flächen K4 und K5	118
Abb. 4-53: Veränderung der mittleren Autokorrelation und Sensitivität in den Zeitreihen der Jahrringbreite auf den Zusatzflächen im Vergleich der Perioden bis 1980 und seit 1981	119
Abb. 4-54: Veränderung der mittleren Autokorrelation und Sensitivität in den Jahrringbreiten-Zeitreihen der Kernflächen im Vergleich der Perioden bis 1980 und seit 1981	119
Abb. 4-55: Jahrringindex-Zeitreihen des herrschenden Bestands auf den fünf Kernflächen	120
Abb. 4-56: Verlauf der Bestandes-Chronologien für den herrschenden (1+2) und den beherrschten Bestand (3+4) der beprobten Trauben-Eichen auf K1 und K2	121
Abb. 4-57: Mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen den Jahrringindex-Zeitreihen der Einzelbäume auf den Kernflächen über der Zeit	122
Abb. 4-58: Mittlere Gleichläufigkeit der Jahrringindex-Zeitreihen auf den Kernflächen.....	123
Abb. 4-59: Mittlere Gleichläufigkeit und Korrelationskoeffizienten der Jahrringindex-Zeitreihen auf den Flächen K1 bis K3, getrennt nach Sozialklassen	124
Abb. 4-60: Mittlere Gleichläufigkeit und Korrelation zwischen den Jahrringindex-Zeitreihen der Probebäume auf den Zusatzflächen	125
Abb. 4-61: Jahrringindex-Zeitreihen für die 20 Zusatzflächen im Vergleich	126
Abb. 4-62: Weiserjahre in den Stichproben des herrschenden und des beherrschten Bestands der Kernflächen K1-K5	127
Abb. 4-63: Häufigkeit von Weiserjahren auf den Kernflächen und Verteilung auf den Auswertungszeitraum ..	128
Abb. 4-64: Dendrogramm nach hierarchischer Clusteranalyse zur Feststellung der Ähnlichkeit zwischen den Zeitreihen der einfachen negativen und positiven Weiserjahre auf den Flächen K1 bis K5	129
Abb. 4-65: Dendrogramme nach hierarchischer Clusteranalyse für negative Weiserjahre der Zusatzflächen ...	130
Abb. 4-66: Häufigkeit der Weiserjahre auf 14 Zusatzflächen und Verteilung auf den Auswertungszeitraum ...	131
Abb. 4-67: Jahresniederschlagssummen und der Jahresmitteltemperaturen 1951-2009 auf den Kernflächen ...	132
Abb. 4-68: Verlauf der Jahresmitteltemperaturen und der Jahresniederschlagssummen im Mittel der Referenzstationen in Ostbrandenburg	132
Abb. 4-69: Entwicklung des Trockenheitsindex TI nach DE MARTONNE (1926) sowie des Kontinentalitätsindex KI nach GORCZYNSKI (1920) auf den Kernflächen	133
Abb. 4-70: Beziehungen zwischen Jahrringindex und Abweichung der Jahresniederschlagssumme vom langjährigen Mittel für die Kernflächen (herrschender Bestand) im Zeitraum 1951-2006.....	134
Abb. 4-71: Beziehungen zwischen Jahrringindex und Trockenheitsindex für die Kernflächen 1951-2006	135
Abb. 4-72: Korrelationskoeffizienten zwischen den Jahrringindexwerten der Zusatzflächen und der Abweichung der Jahresniederschläge vom langjährigen Mittel sowie dem Trockenheitsindex	136

Abb. 4-73: Korrelationskoeffizienten zwischen monatlichen Niederschlagssummen und Jahrringindex auf den Kernflächen 1951-2006, berechnet mit <code>bootRes</code>	137
Abb. 4-74: Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen monatlichen Niederschlagssummen beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen und dem Jahrringindex auf ausgewählten Zusatzflächen	138
Abb. 4-75: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen Monatswerten von Niederschlag und Temperatur 1951-2006 für die Sozialklasse 1+2 auf den Kernflächen	140
Abb. 4-76: Korrelationskoeffizienten zwischen den Monats-Niederschlagssummen beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen und dem Jahrringindex für die Kernfläche K3 und die Zusatzfläche KS6132	141
Abb. 4-77: Korrelationskoeffizienten zwischen monatlichen Niederschlagssummen beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen und dem Jahrringindex auf den Kernflächen	143
Abb. 4-78: Statistisch signifikante <i>bootstrapped</i> -Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen Monatswerten von Niederschlag und Temperatur und dem Jahrringindex auf den Kernflächen	144
Abb. 4-79: Signifikant mit der Jahrringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres bis 31.10. des aktuellen Jahres von Temperatur und Niederschlag nach Berechnung durch CLIMTREG für die Fläche K1, herrschender Bestand, Bezug: 1951-2006.....	146
Abb. 4-80: Signifikant mit der Jahrringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres bis 31.10. des aktuellen Jahres von Temperatur und Niederschlag nach Berechnung durch CLIMTREG für die Kernflächen, herrschender Bestand, Bezug: 1951-2006.....	147
Abb. 4-81: Signifikant mit der Jahrringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres bis 31.10. des aktuellen Jahres von Temperatur und Niederschlag nach Berechnung durch CLIMTREG für ausgewählte Zusatzflächen, Bezug: 1951-2006.	147
Abb. 4-82: Verteilung der mit CLIMTREG bestimmten Korrelationskoeffizienten zwischen Jahrringindex und Zeiträumen des Niederschlags beziehungsweise der Temperatur im Mittel der deutschen Kernflächen und der ausgewählten Zusatzflächen bei Modellierung auf Grundlage verschiedener Kalibrierungsperioden	149
Abb. 4-83: Sensitivität der von CLIMTREG erzeugten Schätzmodelle für den Jahrringindex nach Hauptkomponentenregression bei unterschiedlichen Kalibrierungszeiträumen	150
Abb. 4-84: Verlauf der Jahrringindexwerte für den herrschenden Bestand auf K2 abgeleitet aus den gemessenen Jahrringbreiten im Vergleich mit der Modellierung nach Hauptkomponenten-Regression.....	151
Abb. 4-85: Wirkung der Kalibrierung des Schätzmodells für den Jahrringindex auf Basis von zwei verschiedenen Zeiträumen am Beispiel der herrschenden Trauben-Eichen auf K2	152
Abb. 4-86: Kumulative Abweichungen der in CLIMTREG auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume modellierten Jahrringindex-Zeitreihen vom Referenzwert 1 im Szenariozeitraum 2001-2055 für den herrschenden Bestand der deutschen Kernflächen	152
Abb. 4-87: Verteilung der Jahrringindizes im Zeitraum 2001-2055 nach Modellierung durch CLIMTREG auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume für die Flächen K1-K3, herrschender Bestand	153
Abb. 5-88: Veränderung der Mitteltemperaturen nach Jahreszeiten in den Messreihen für die Kernflächen ...	162
Abb. 5-89: Entwicklung der jährlichen Grünlandtemperatursumme 200 in Bezug auf den Tag im Jahr für den Zeitraum 1951-2009 für die fünf Kernflächen sowie das Mittel der Referenzstationen	163
Abb. 5-90: Trockenheitsindex für die Monate April und Juni sowie das gesamte Jahr über die Perioden 1951-2006 (Referenz) und 2007-2060 (Szenario) für K1, K2 und K3 sowie für die Zusatzflächen	164
Abb. 5-91: Kumulative Bilanzen von Niederschlag und Temperatur im Jahresverlauf im Szenario- (2007-2060) und Referenzzeitraum (1951-2006) für die deutschen Kernflächen (K1-K3) und die Zusatzflächen (ZF)	166
Abb. 5-92: Schematische Darstellung der möglichen Korrelationen zwischen dem Jahrringindex und den einzelnen Witterungsfaktoren Temperatur beziehungsweise Niederschlag sowie den kombinierten Faktoren in Abhängigkeit vom Breitengrad des Untersuchungsgebiets	168
Abb. 5-93: Verlauf des jährlichen Radialzuwachses für Eiche und Kiefer im Mittel von K1 bis K5	170
Abb. 5-94: Das " <i>disease triangle</i> " als Konzept zur Analyse von Komplexkrankheiten	176
Abb. 5-95: Entwicklung der Kronenstrukturstufen und des prozentualen Laubverlusts auf den deutschen Kernflächen in den Jahren 2006-2012	181
Abb. 5-96: Vergleich von Methoden zur Identifikation von Weiserjahren anhand der Kernflächen K1-K3	182
Abb. 5-97: Prozentualer Anteil der Jahre mit gleichgerichteten Änderungen des Jahrringindex bei allen Bäumen der Stichproben im herrschenden Bestand der Kernflächen in der Zeit 1900-2006.....	185
Abb. 5-98: Autokorrelation erster Ordnung und partielle Autokorrelation der einzelnen Jahre für die Jahrringbreiten-Zeitreihe des herrschenden Bestandes von K2	187
Abb. 5-99: Größe der vom Eichenprozessionsspinner geschädigten Flächen mit Trauben-Eiche im Bundesland Brandenburg seit 2008	195

Abkürzungen

AK	Autokorrelation
BHD	Brusthöhendurchmesser
CIN	<i>Common Interval</i>
CLIMTREG	<i>Climatic Impact on Tree Growth</i>
EPS	<i>Expressed Population Signal</i>
ET	Ertragstafel
GLK	Gleichläufigkeit
iDa	Jährlicher Zuwachs des Brusthöhendurchmessers
iGa	Jährlicher Kreisflächenzuwachs
iRa	Jährlicher Radialzuwachs auf Brusthöhe
INKA BB	Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg-Berlin
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
JRB	Jahrringbreite
JRI	Jahrringindex
KF	Kernfläche(n)
KSt	Kronenstrukturstufe
LbV	prozentualer Laubverlust
LFE	Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde
m. R. / o. R.	mit Rinde / ohne Rinde
N	Niederschlag
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
S	Sensitivität
STAR (2)	Statistisches Regionalisierungsverfahren (Generation 2)
SRES	<i>Scientific Report on Emission Scenarios</i>
T	Temperatur
TI	Trockenheitsindex
WJ	Weiserjahr
ZALF	Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.
ZF	Zusatzfläche(n)

1 Einführung und Untersuchungsansatz

1.1 Waldnutzung im Klimawandel

Seit Menschen die Artenzusammensetzung und den räumlichen Aufbau von Wäldern zu ihren Zwecken beeinflussen, stehen sie vor der Herausforderung, bei Entscheidungen für oder gegen bestimmte Maßnahmen deren Folgen mit einem hohen Maß an Langfristigkeit und Unsicherheit abschätzen zu müssen. In den vergangenen Jahrhunderten waren diese Unsicherheiten hauptsächlich auf mögliche gesellschaftliche und wirtschaftliche Veränderungen bezogen. Der Zustand und die Nutzung der Wälder wurden vor allem von der sozialökonomisch begründeten Abfolge verschiedener waldbaulicher Metakonzepte vom Dauerwaldgedanken zu Beginn des 20. Jahrhunderts bis hin zu industriemäßigen Produktionsmethoden zum Beispiel auf dem Gebiet der DDR beeinflusst (THOMASIU 1992, NELSON 2005). Dabei wurde in der Regel von "Standortkonstanz" ausgegangen, also von natürlichen Produktionsbedingungen, die sich mit einem bestimmten Maß von Schwankungen in einem konstanten Rahmen bewegen (RÖHLE 1995).

Das Prinzip der Standortkonstanz ist schon für frühere Jahrhunderte auf Grund ökosystemarer Interaktionen, langfristiger Klimaschwankungen und menschlicher Einflüsse durchaus in Frage zu stellen. Spätestens seit Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts ist jedoch in Form des anthropogenen Klimawandels eine weitere Dimension von Veränderungen hinzugekommen, die sich deutlich auf den Wald und seine Nutzungsformen auswirken wird (KIRILENKO & SEDJO 2007; HANEWINKEL et al. 2009). Von einer Konstanz der natürlichen Standortbedingungen, auf denen die vielfältigen Funktionen der Wälder für die Gesellschaft beruhen, kann seitdem nicht mehr ausgegangen werden: Wegen der komplexen Wechselwirkungen zwischen Witterungsparametern, abiotischen Bodeneigenschaften und den Aktivitäten der Bodenlebewesen unterliegt nicht nur das Klima einer gerichteten Veränderung, auch die anderen Standortfaktoren verändern sich (BOISVENUE & RUNNING 2006). Dies wirkt sich auf vielfältige Weise auf das Wachstum und die Entwicklung der Bäume aus, aber auch auf die Art und Stärke der Kopplungen in den Waldökosystemen, auf ihre fördernden oder antagonistischen Beziehungen zu anderen Organismen.

Die vergangenen Jahrzehnte sind aber nicht nur vom Wandel des Klimas und der Standortbedingungen geprägt worden, sondern auch von auffälligen Wachstumstrends bei einer Reihe von Baumarten in vielen Regionen Europas (RÖHLE 1995; SPIECKER 1999). Ein beschleunigtes Wachstum wird zwar nicht überall bestätigt (NEUMANN & RÖHLE 2001), ist aber in vielen Fällen eindrucksvoll belegt (SPIECKER et al. 1996; UTSCHIG et al. 2006). Besonders in den 1970er und 80er Jahren traten außerdem in großem Umfang Kronenverlichtungen und Zuwachsverluste bis hin zu gesteigerter Mortalität auf, die ebenfalls auf veränderte Standortverhältnisse durch Immissionen und häufigere Extremwetterlagen zurückgeführt wurden (NEBE 1998; LARCHER 2001). Nachdem gerade in den 1990er Jahren die Benadelung der Kiefern und – vor allem in Süddeutschland – der Tannen und Fichten im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit stand, sind seit zwei Jahrzehnten in weiten Teilen Deutschlands besonders die Eichenarten und aktuell auch die Buche von erheblichen Vita-

litätsproblemen betroffen. Beide Phänomene – das veränderte Wachstumsverhalten und der häufig kritische Zustand einer Reihe von Baumarten – werden in vielen Untersuchungen mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht (DOBBERTIN 2005; KAHLE et al. 2007; LINDNER et al. 2010).

Vor diesem Hintergrund stehen die Planung der Waldnutzung und die Waldbewirtschaftung vor der Herausforderung, bei ungenügendem Wissen eine ungewisse Zukunft gestalten zu müssen (WAGNER 2008; HEINIMANN 2010): Es ist weder hinreichend bekannt, wie die Lebensbedingungen für die Wälder in der Zukunft als Folge des Klimawandels sein werden, noch besteht Klarheit darüber, inwieweit sich unsere Baumarten an diese neuen Verhältnisse anzupassen in der Lage sind. Die waldbaulichen Leitlinien formulieren deshalb nicht nur in Brandenburg das Ziel, den erhöhten und zum Teil noch unbekanntem Risiken für Vitalität und Produktivität durch die Stabilisierung des Bestehenden, die Minimierung und Streuung von bekannten Risiken sowie durch einen fortgesetzten Waldumbau hin zu mehr Widerstandskraft und Resilienz zu begegnen (MIL 2011b).

Bei aller derzeit noch bestehenden Unsicherheit über die realen Ausmaße des Klimawandels ist eine seiner wahrscheinlichsten Folgen das vermehrte Auftreten von Witterungsextremen (IPCC 2007; LINKE et al. 2010). In Bezug auf die Wälder bedeutet das eine zunehmende Häufigkeit von Störungen, die schnelle und drastische Auswirkungen auf die Gesundheit und Produktivität der Bestände haben können. Störungsanfällige Waldökosysteme wie die in Deutschland noch weit verbreiteten Nadelholzreinbestände sind besonders von den negativen Folgen des Klimawandels betroffen, intensive Störungen wie Insektenmassenvermehrungen bedrohen hier einen großen Teil der Waldfunktionen für die menschliche Gesellschaft. Die etwa in Brandenburg noch auf 78 Prozent der Waldfläche vorherrschende Kiefer ist zum Beispiel gerade im Reinbestand durch Waldbrände und Insektenkalamitäten gefährdet (MLUV 2007); bei großflächigem Absterben nehmen nicht nur die finanzielle Seite der Waldnutzung, sondern auch andere Waldfunktionen wie die Erholungswirkungen Schaden.

Auf Grund dieser Zusammenhänge und der Überlegung, dass die Risiken für Kiefernreinbestände im Klimawandel weiter zunehmen werden, unternehmen die staatliche Forstverwaltung und die Forstbetriebe seit mehr als dreißig Jahren große Anstrengungen zu einem ökologischen Waldumbau (MÜLLER & LUTHARDT 2009). Ein steigender Anteil von Laubholz vor allem in Mischung mit Kiefer soll zur Senkung und Verteilung der Klimawandelrisiken führen und die vielfältigen Waldfunktionen auch in Zukunft gewährleisten (MLUR 2004). Auf höherer Ebene soll das dazu beitragen, die Rolle des Waldes als stabilisierendes Element in der Landschaft unter den Bedingungen sich verändernder Umweltbedingungen zu sichern (BOLTE et al. 2009; HEINIMANN 2010). Durch die Kohlenstoff-Fixierung im Prozess des Biomasse-Aufbaus kann eine angepasste Forstwirtschaft außerdem dazu beitragen, das Ausmaß und die Folgen des anthropogenen Klimawandels zu begrenzen (CANADELL & RAUPACH 2008).

1.2 Die Trauben-Eiche in Brandenburg: Sorgenkind oder Hoffnungsträger?

Die standörtlichen Voraussetzungen in weiten Teilen Brandenburgs engen die Optionen möglicher Mischbestände auf wenige Baumarten ein; neben der Buche spielt die Trauben-Eiche eine Hauptrolle beim Waldumbau vor allem im trockeneren, subkontinentalen Süden und Osten des Landes (ELMER et al. 2009). Ein wichtiger Grund dafür ist, dass auf etwa zwei Dritteln der heutigen Brandenburger Waldfläche die Eichenarten in der potentiell-natürlichen Vegetation mindestens zur Hälfte am Bestandaufbau beteiligt wären (RÜFFER & KÄTZEL 2006). Analysen des Istzustands belegen den enorm hohen Anteil junger Eichenbestände, der hauptsächlich auf die Umbau-Aktivitäten zurückzuführen ist (Abb. 1-1). Von den im "Datenspeicher Wald" für die Trauben-Eiche ausgewiesenen insgesamt gut 30.000 Hektar in Brandenburg sind etwa 75 % Mischbestände, davon etwa 90 % mit der Kiefer (MÜLLER 2006). Für die Zukunft ist eine weitere Erhöhung der Eichenfläche in den Brandenburger Wäldern geplant; mittelfristig wird ein Anteil von 8,5 % eichendominierten Laubmischwäldern sowie von 17 % Eichenwäldern mit Nadelholzbeimischung angestrebt (LFE 2007, unveröffentlicht).

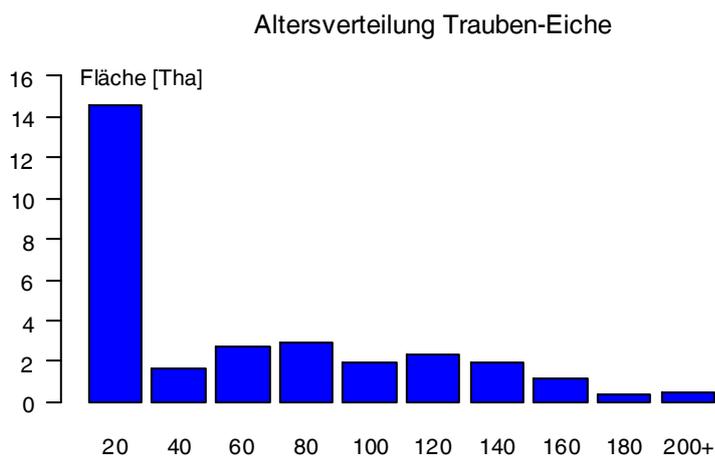


Abb. 1-1: Größe der von Trauben-Eiche in verschiedenen Altersstufen bestockten Waldflächen in Brandenburg zum 01.01.2007 nach Abfrage des Datenspeichers Wald

In scharfem Kontrast zu den Hoffnungen auf anpassungsfähigere und stabilere Wälder, die sich mit der Trauben-Eiche verbinden, stehen die seit Jahrzehnten für beide heimischen Eichenarten diagnostizierten Vitalitätsprobleme. Die in Brandenburg seit 1991 regelmäßig durchgeführten Waldzustandserhebungen verzeichnen für die Eichen so gut wie jedes Jahr die höchsten mittleren Laubverlustprozente (KALLWEIT 2006, MIL 2011a). Die Ursachen für den verbreitet unbefriedigenden Kronenzustand sind vielschichtig; sie werden seit Jahren intensiv erforscht und diskutiert (THOMAS et al. 2002; KÄTZEL et al. 2006). Die Komplexität der Gründe, die weite Verbreitung und lange Dauer des aktuellen Krankheitsgeschehens haben dazu geführt, dass häufig von einer "Komplexkrankheit" oder sogar vom "Eichensterben" gesprochen wird (HARTMANN & BLANK 1998; OSZAKO & DELATOUR 2000). Eine zentrale Rolle in den meisten Erklärungsansätzen spielen extreme Witterungs-

erscheinungen wie längere Trockenperioden oder harte Winterfröste (FÜHRER 1998). Derartige Ereignisse ziehen häufig Folgeschäden wie gesteigerten Insektenfraß und pilzliche Erkrankungen auf Grund mangelnder Reaktionsfähigkeit oder erhöhter Anfälligkeit gegen Schwächeparasiten nach sich (MÖLLER et al. 2006). Historische Aufzeichnungen über Perioden gesteigerter Eichenmortalität stützen die These, dass das kombinierte Wirken negativer abiotischer und biotischer Einflüsse für immer wieder auftretende Episoden auffälliger Vitalitätsprobleme bei der Eiche verantwortlich ist (HARTMANN & BLANK 1992). Die waldbauliche Behandlung kann diese Schäden verstärken, wenn sie zum Beispiel durch das Streben nach hohen Bestandesdichten die Ausbildung hinreichend großer und vitaler Kronen hemmt (SPELLMANN 2001; SCHRÖDER 2012). Ein unzureichender Gesundheitszustand ist nicht nur wegen der gesteigerten Mortalität problematisch, es ist außerdem zu befürchten, dass Vitalitätsmängel Zuwachseinbußen nach sich ziehen, die für die Forstbetriebe ökonomisch relevant sein können (LINDNER et al. 2010). Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht eindeutig belegt, vor allem, was den Umfang der tatsächlich eintretenden Verluste betrifft. Er bildet deshalb einen der Ansatzpunkte für die Beschäftigung mit dem Themenkomplex Vitalität – Zuwachs – Witterung, der im Zentrum der vorliegenden Arbeit steht.

1.3 Ziele und Forschungsfragen

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, vor dem Hintergrund des Klimawandels die witterungsbedingten Risiken für die waldbauliche Eignung der Trauben-Eiche als eine der Hauptwirtschaftsbaumarten unter nordostdeutschen Verhältnissen möglichst wirklichkeitsnah und umfassend einzuschätzen. Sie soll dazu beitragen, die ökologische Rolle und das wirtschaftliche Potential der Baumart bei Anpassungsmaßnahmen an Klimawandelfolgen im Bereich der Forstwirtschaft realistisch beurteilen zu können, damit diese Aktivitäten standörtlich differenziert und ökonomisch sinnvoll umgesetzt werden können.

Entsprechend der großen Bedeutung der Witterung und ihrer Extreme in den aktuellen Erklärungsansätzen für die Vitalitätsprobleme der Eiche steht – wie bereits angedeutet – das komplexe Beziehungsgefüge zwischen den Witterungsbedingungen, dem Wuchsverhalten und der äußerlich einschätzbaren Vitalität im Mittelpunkt der Betrachtungen. Die Analysen stützen sich auf eine große Zahl von Versuchsflächendaten, die mit dem Ziel ausgewertet werden, statistische Beziehungen herauszuarbeiten, deren Einspeisung in Szenarien der zukünftigen klimatischen Entwicklung im Untersuchungsgebiet zu belastbaren Risikoabschätzungen führt. Der methodische Schwerpunkt der Arbeit ist die Untersuchung der Witterungseinflüsse vor allem auf die Jahrringbreite als zentralem Indikator sowohl für die Produktivität im Sinne der Biomassebildung als auch für die Vitalität im Sinne der "Lebenskraft" der Bäume.

Aus diesen allgemeinen Themen lässt sich eine Vielzahl von Forschungsfragen ableiten, von denen im gegebenen Rahmen nur eine Auswahl bearbeitet werden soll:

- (1) Zu welchen Ergebnissen führt die Anwendung verschiedener Methoden zur Einschätzung der Einzelbaumvitalität, und welche Zusammenhänge bestehen zwischen ihnen sowie dem Zuwachs der Bäume?
- (2) In welchem Verhältnis stehen die Ausprägungen von Witterungsparametern und das Zuwachsverhalten der Bäume? Sind diese Zusammenhänge zeitlich stabil oder variabel? Welche Folgen für das Wachstum hatten Witterungsextreme in der Vergangenheit?
- (3) Was folgt aus den Teilerkenntnissen, vor allem aus den gefundenen Witterungs-Zuwachs-Beziehungen, für die Eignung der Trauben-Eiche für den zukünftigen Waldbau in Nordostdeutschland?

Diese eher allgemeinen Kernfragen bilden die Grundstruktur der Arbeit und sollen an ihrem Ende möglichst aggregiert und umfassend beantwortet werden. Dazu ist eine Reihe von Detailfragen zu beantworten, die aber erst nach einer Sichtung des aktuellen Forschungsstands formuliert werden sollen (siehe 2.5). In den Unterkapiteln des Abschnitts "Methodik" wird dann näher auf das jeweils notwendige Vorgehen eingegangen.

Entsprechend der Komplexität des Themas sind immer wieder integrierende Auswertungen nötig, die verschiedene Teilergebnisse und Skalenebenen verbinden. Auch die allgemeine und spezielle Zielbeschreibung machen deutlich, dass es im Folgenden nicht nur um waldwachstumskundliche Themen, Methoden und Auswertungen gehen wird. Die aufgeworfenen Fragen verlangen vielmehr einen Untersuchungsansatz, der Fachgrenzen überschreitet, Erkenntnisse und Verfahren anderer Disziplinen einbezieht und schließlich zu Analysen führt, die auch außerhalb der Waldwachstumskunde von Interesse sind. Dies entspricht dem übergeordneten Ziel, anstelle punktuell sehr detaillierter Ergebnisse eher einen Überblick über den Stand der wissenschaftlichen Diskussion und der verwendeten Methoden im Themenkomplex "Vitalität und Wachstum" für die Zukunftsbaumart Trauben-Eiche in Nordostdeutschland zu präsentieren. Konzeptionell wird deshalb eine Art "Sanduhr-Ansatz" verfolgt: Ausgehend von relativ breiten, allgemeinen Betrachtungen werden die Untersuchungsthemen bis zur Ergebnispräsentation immer kleinteiliger und die Methoden immer detailorientierter, während die Diskussion und die Wertung der Ergebnisse den umgekehrten Weg in Richtung einer möglichst umfassenden Synthese mit Blick auf die allgemeine Situation in Brandenburg gehen.

2 Hintergrund: Wachstum und Vitalität der Trauben-Eiche

2.1 Geschichtlicher Hintergrund und aktuelle Probleme

Die Trauben-Eiche (*Quercus petraea* [MATT.] LIEBL.) ist eine Charakterbaumart des nordostdeutschen Tieflands und spielt in der potentiellen natürlichen Vegetation Brandenburgs eine dominierende Rolle. Sie ist (mit der Stiel-Eiche *Quercus robur* L.) zur "Eiche" zusammengefasst)¹ auch über forstliche Kreise hinaus bekannt und seit langer Zeit so eng wie kaum eine andere Baumart mit der historischen menschlichen Nutzung der Wälder verbunden. In der Kunst und der Kulturgeschichte stehen Eichen sinnbildlich für Stärke, Standhaftigkeit, Treue und Langlebigkeit, man findet sie in den Holzschnitten Albrecht Dürers, in den Gemälden Caspar David Friedrichs und in der Lyrik Heinrich Heines. Bäume, Früchte und Blätter zieren Stadtwappen, Kartenspiele und Ehrenzeichen. Das nacheiszeitliche Europa konnten die Eichenarten nicht zuletzt auf Grund der Förderung durch die Menschen relativ rasch wieder besiedeln (RÜFFER & KÄTZEL 2006). Ende des 17. Jahrhunderts schrieb ein Erlass Friedrich Wilhelms von Brandenburg Brautpaaren vor, anlässlich ihrer Vermählung sechs Eichen zu pflanzen. Über Jahrhunderte hinweg waren Eichenwälder als Viehweide, für die Holzgewinnung und vielfältige andere Waldnutzungen von unersetzlicher Bedeutung (AAS 2006; HASEL & SCHWARTZ 2006).

Trotz dieser engen historischen Verbundenheit hat sich das Verhältnis zwischen Menschen und Eichen deutlich gewandelt. Heinrich COTTA stellte schon 1817 (in KRAHL-URBAN 1959) fest: "Die Eichen- und Weißtannenwaldungen wollen sich unseren Forstordnungen und systematischen Einrichtungen am wenigsten fügen ... und es ist zu besorgen, daß sie ihren früheren Bewohnern, den Auerochsen, am Ende folgen werden." Sein Skeptizismus hatte mehrere Ursachen: Zum einen führten soziale und wirtschaftliche Veränderungen schon zur Zeit der Entstehung einer geplanten, geregelten Forstwirtschaft in Preußen und anderen deutschen Ländern mit Beginn des 19. Jahrhunderts dazu, dass bis dahin weit verbreitete Formen der Waldnutzung, in denen die Eiche eine wichtige Rolle einnahm, an Bedeutung verloren und durch andere Bewirtschaftungssysteme verdrängt wurden. Die weit verbreiteten, oft devastierten Nieder- und Hutewälder mit hohen Eichenanteilen fielen dem Landhunger des Ackerbaus zum Opfer, oder es traten Altersklassenwälder aus Kiefer und Fichte an ihre Stelle (HASEL & SCHWARTZ 2006). Mitte des 19. Jahrhunderts stellten die aufkommende Bodenreinertragslehre und das "Normalwaldmodell" die langen Umtriebszeiten der Eichenwirtschaft grundsätzlich in Frage. Daraus resultierende Forderungen nach größtmöglicher Rentabilität sowie die steigende Nachfrage nach Nadelholz führten zur Aufgabe vieler Eichenwälder und zur Neubepflanzung oder Saat mit Kiefern oder Fichten, die in wesentlich kürzerer Zeit Erlöse versprachen. Die abnehmende Verwendung von

¹ Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Diskussionen um die eindeutige taxonomische Klassifizierung der heimischen Eichen keine Rolle spielen. Im Einklang mit der für die brandenburgische Forstwirtschaft maßgeblichen Auffassung wird von der Möglichkeit ausgegangen, dass Stiel- und Trauben-Eiche im Untersuchungsgebiet abgrenzbare Arten sind (KÄTZEL 2006; HÖLTKEN et al. 2012). Hybriden zwischen beiden Arten kommen vor, bilden aber nicht den Hauptteil der hier vorkommenden Populationen. Entscheidender für den Standpunkt, hier durchgängig von Trauben-Eichen zu sprechen, sind die Unterschiede in den standörtlichen Ansprüchen und zum Teil im ökologischen Verhalten der Bäume (KRAHL-URBAN 1959; GRÜLL 2006; SCHÜTT et al. 2011).

Eichenholz im Haus- und Schiffbau, im Möbelbau und im Bergbau wurde nur zum Teil durch den rasch wachsenden Bedarf an Furnierholz ausgeglichen (KRAHL-URBAN 1959). Alternative Nutzungsformen wie Waldweide, Gerbrindegewinnung oder das Sammeln der Galläpfel haben seit etwa einhundert Jahren massiv an Bedeutung verloren¹. Aktuell wird Eichenholz vor allem zum Möbel- und Fußbodenbau, als Bauholz zur Rekonstruktion von Fachwerken und zum Innenausbau, als Pfahl- und Mastware oder als "Stabholz" zum Bau von Fässern verwendet (AAS 2006; SCHÜTT et al. 2011). Die Verwendung als Furnier verspricht den größten finanziellen Gewinn, setzt aber die höchste Holzqualität voraus.

Die waldbaulich anspruchsvolle Behandlung, die zur Erzeugung hochwertigen Stammholzes über einen sehr langen Zeitraum notwendig ist, stellt eine zweite Ursache für COTTAS Bedenken hinsichtlich der Perspektiven für die Eiche dar. Ihre ökologischen Ansprüche als Lichtbaumart und ihre relative Konkurrenzschwäche erfordern eine darauf abgestimmte waldbauliche Steuerung der Eichenbestände, die mit den Schemata anderer, stärker verbreiteter Baumarten nicht übereinstimmt (LOCKOW 2006b). Die sogenannte "Dunkelwirtschaft" mit hoher Stammzahlhaltung über längere Zeit und niederdurchforstungsartigen Behandlungsstrategien, wie sie gerade in der ersten Hälfte des zwanzigsten Jahrhunderts häufig propagiert wurde, ist für die Eiche weder im Rein- noch im Mischbestand anwendbar (SPIECKER 1999; BURSCHEL & HUSS 2003)². Werden Eichenbestände nach nicht angepassten oder mehrmals wechselnden Konzepten behandelt, führt das zu unbefriedigenden Stammformen und geringen Erträgen. Als Konsequenz sind die anspruchsvollen Bestände schließlich oft vernachlässigt oder ganz in "pflegeleichtere" Waldaufbauformen umgewandelt worden. Parallel zur abnehmenden wirtschaftlichen Bedeutung des Eichenholzes ist so die von Eichen in Rein- und Mischbeständen bestockte Waldfläche auf heute etwa 9,6 Prozent bundesweit und 4,4 Prozent in Brandenburg zurückgegangen (MÜLLER 2006).

Eine dritte Erscheinung, die besonders in jüngerer Zeit zu kritischen Einschätzungen der Zukunftsfähigkeit der Eichen führt, sind ihre Vitalitätsprobleme und erhöhten Mortalitätsraten. Sie sind in regional unterschiedlicher Ausprägung seit zwei bis drei Jahrzehnten zu beobachten (EISENHAUER 1991; HARTMANN & BLANK 1992, FÜHRER 1998, KÄTZEL et al. 2006). Obwohl es nur in lokal begrenzten Fällen zu deutlich gesteigertem Absterben gekommen ist, verbinden sich für viele forstliche Praktiker eigene Erfahrungen und prägnante Bilder mit den Schlagworten "Welke" oder "Eichensterben" (*decline*). Die Hartnäckigkeit des Problems hat zusammen mit der noch immer nicht befriedigend beantworteten Ursachenfrage und der Komplexität des Wirkungsgefüges dazu geführt, dass die Eiche gerade in Nordostdeutschland zwar als heimisch und angepasst, aber gleichzeitig auch als waldbaulich anspruchsvoll und nicht unproblematisch wahrgenommen wird. Die verstärkte waldbauliche Hinwendung zur Eiche vor allem im Zuge des ökologischen Waldumbaus trifft in

¹ Einen Überblick über die wirtschaftliche Bedeutung der Eichen von der Vergangenheit bis in die Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg gibt KRAHL-URBAN (1959).

² Die Eignung von Niederdurchforstung oder "Dunkelwirtschaft" für andere Baumarten soll hier nicht diskutiert werden.

der forstlichen Praxis so auch auf ein Bewusstsein von Risiken, die vor allem in Richtung Betriebssicherheit und Vitalität gesehen werden (LUTHARDT & KÄTZEL 2006).

2.1.1 Bedeutung der Trauben-Eiche in Gegenwart und Zukunft

In der potentiell-natürlichen Vegetation Brandenburgs ("pnV"; HOFMANN & POMMER 2005) bei Annahme heutiger Klima- und Standortverhältnisse nehmen Eichenwaldgesellschaften gut 61 % der aktuell waldbedeckten Fläche ein (RÜFFER & KÄTZEL 2006). Davon entfallen knapp drei Viertel auf subkontinentale Mischwälder vor allem mit Kiefer und Winter-Linde sowie gut ein Viertel auf Eichen-Hainbuchen-Buchen-Mischwälder. Nach Angaben des Informationssystems "Datenspeicher Wald" waren in Brandenburg 2005 jedoch nur rund 4,4 % (etwa 57.300 Hektar) der Waldfläche mit Eichen bestockt, davon 25.300 ha mit Trauben- und 19.900 ha mit Stiel-Eiche; gut 12.000 ha sind sogenannten "Mischtypen" zuzuordnen, bei denen die Artenstruktur nicht geklärt ist (MÜLLER 2006). Etwa ein Viertel der Eichenfläche wird von Reinbeständen eingenommen, die übrigen Eichen wachsen in Mischbeständen, die meist zweistufig aufgebaut sind.

Die gegenwärtig von Beständen unter maßgeblicher Beteiligung der Eichenarten eingenommene Waldfläche soll nach der forstlichen Rahmenplanung der brandenburgischen Landesforstverwaltung (MLUV 2009, unveröffentlicht) langfristig auf etwa 25 % gesteigert werden. Die damit angestrebten rund 230.000 Hektar sollen zu etwa zwei Dritteln mit Eichen-Nadelholz-Bestandestypen, zu einem Drittel mit Eichen-Laubwäldern mit Nadelholzanteilen von weniger als fünfzig beziehungsweise weniger als zehn Prozent bestockt sein.

Aus wirtschaftlicher Sicht sind aus Eichenbeständen vor allem astfreie, gerade und gleichmäßig gewachsene Sortimenten mit hohem BHD von Interesse. Die Preise für dieses furnier-taugliche "Wertholz" betragen nicht selten weit über tausend Euro je Festmeter. Für die Erzeugung von Eichen-Stammholz starker Dimensionen unter durchschnittlichen nordost-deutschen Bedingungen sind jedoch enorme Zeitspannen von etwa 140 bis über 200 Jahren nötig (MLUR 2004). Das stringente Einhalten der für qualitativ hochwertiges Holz nötigen Bewirtschaftungslinie durch sachkundiges Personal über derart lange Zeiträume war in der Vergangenheit aus einer Vielzahl von Gründen nur vereinzelt möglich. Vernachlässigt man die Pflege der Eichenbestände, dann sind häufig irreversible Qualitätseinbußen die Folge (BÄUCKER & BUES 2009).

Neben dem häufig nicht befriedigenden Zustand vieler Eichenbestände und dem für Wertholz notwendigen Pflegeaufwand gewinnt aktuell ein dritter Faktor an Bedeutung, der eine verstärkte Hinwendung zu Bewirtschaftungskonzepten jenseits des Wertholzziels nahe legt: Die Unsicherheit hinsichtlich der Entwicklung der Wuchsbedingungen und des Anpassungsvermögens der Eiche an zunehmende Witterungsextreme führt dazu, dass immer weniger damit gerechnet werden kann, die langen Umtriebszeiten der traditionellen Konzepte ohne größere Störungen und deren Folgen zu erreichen. Viele aktuelle Überlegungen zur Bewirtschaftung der Eiche zielen so auch zunehmend auf eine optimale Vitalität und Stabi-

lität auf Einzelbaum- sowie auf Bestandesebene, die als notwendige Bedingungen für das Erreichen wirtschaftlicher Ziele gesehen werden (MOSANDL 1991; MLUR 2004; DONG 2007; SPIECKER 1991). Derartige Überlegungen reflektieren jedoch nicht nur die ungewisse Zukunft, sondern sind auch eine Reaktion auf die auffälligen Vitalitätsprobleme in der jüngeren Vergangenheit und Gegenwart, die mit dem Schlagwort "Komplexkrankheit der Eichen" zusammengefasst wird.

2.1.2 Das Phänomen des "Eichensterbens"

Die Waldschadensdiskussion in den letzten Jahrzehnten des vergangenen Jahrhunderts konzentrierte sich zuerst vor allem auf Nadelbaumarten, weil dort die deutlichsten Schäden auftraten und die flächenmäßige Relevanz am größten war. Spätestens seit Beginn der 1990er Jahre rückte außerdem aber verstärkt die Eiche in den Fokus der Aufmerksamkeit, da auch bei dieser Baumartengruppe in weiten Teilen Europas Kronenschäden und erhöhte Mortalität auftraten (EISENHAUER 1989; FÜHRER 1998; OSZAKO 2004). Episoden mit regional bedeutsamen Gesundheitsstörungen der Eichen bis hin zu auffälligen Sterbewellen hat es in der jüngeren Waldgeschichte immer wieder gegeben (BALTHASAR 1869; KRAHL-URBAN et al. 1944; HARTMANN & BLANK 1992). Die weite Verbreitung, der hohe Anteil betroffener Bäume und die lange Dauer haben dazu geführt, dass das aktuelle Schädgeschehen häufig mit den Begriffen "Eichensterben" beziehungsweise "*oak decline*" und "*dieback*" bezeichnet wird (EISENHAUER 1991; DONAUBAUER 1998; HARTMANN & BLANK 1998; SONESSON 1999; OSZAKO & DELATOUR 2000). Diese Begriffe haben sich zum Teil als Übertragung aus Gebieten in Nordamerika etabliert, in denen enorme Eichenschäden auftraten (MANION 1981; JENKINS & PALLARDY 1995; KABRICK et al. 2008), lassen sich aber auch durch die lokal teilweise stark gesteigerte Mortalität und die komplexen Ursachen der Schäden auch in Europa begründen. Nach dem Verfahren der europaweiten Waldzustandserhebungen sind seit dessen Etablierung in Brandenburg 1991 die Eichen auch in der Untersuchungsregion fast durchgängig die am stärksten geschädigte Baumartengruppe; aktuell liegt der mittlere Laubverlust in Berlin und Brandenburg bei etwa 23 Prozent (MIL 2011a; siehe Abb. 2-2).

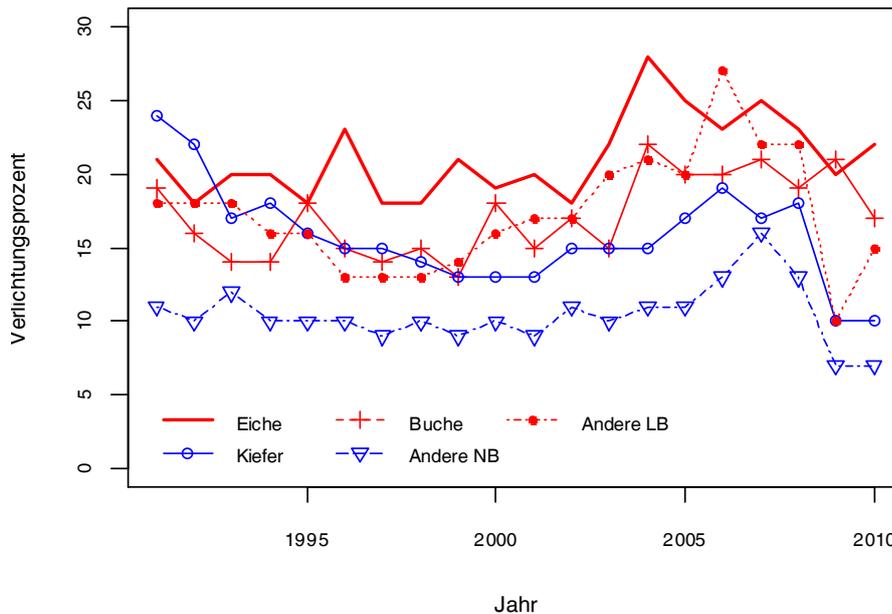


Abb. 2-2: Mittlere Laubverlustprozent nach den jährlichen Waldzustandserhebungen in Brandenburg und Berlin für die wichtigsten Baumarten(gruppen) seit 1991 (Werte aus KALLWEIT 2006 und MIL 2011a)

Über den Charakter der Eichenschäden und deren korrekte Einordnung hinsichtlich der Vielfalt ihrer Ursachen bestehen wissenschaftlich unterschiedliche Auffassungen. Überwiegend wird von einer "Komplexkrankheit" beziehungsweise "*decline*" im Sinne von MANION (1981) und TESCHE (1991) ausgegangen, deren auslösende, begünstigende und verstärkende Faktoren sowohl abiotischer als auch biotischer Art sind (THOMAS et al. 2002; KÄTZEL et al. 2006). Andere Autoren gehen eher von einem Gefüge einzelner Krankheiten und Belastungen mit jeweils abgrenzbaren Ursachen aus, die regional unterschiedlich stark wirken und sich fallweise auf verhängnisvolle Weise so verstärken können, dass es zum Absterben der Bäume kommt (FÜHRER 1998; OSTRY et al. 2011).

2.1.3 Erklärungsansätze für die Vitalitätsprobleme

Sowohl die These von einer Komplexkrankheit der Eichen im Sinne des Modells von MANION (1981; siehe Abschnitt 2.2.2) als auch die Ansätze, die eher von einem Ursachenbündel in Form von regional unterschiedlicher Krankheiten ausgehen, benennen übereinstimmend eine Reihe biotischer wie abiotischer Faktoren, die in einem mehrstufigen Ablauf zusammenwirken. Die konkrete Ausprägung der Schäden folgt auch aus den holzanatomischen und physiologischen Eigenschaften der Eiche: Als ausgesprochen ringporige Baumart ist sie auf die weitgehend aus Reservestoffen gespeiste Anlage weitlumiger Frühholzgefäße noch vor dem Laubaustrieb angewiesen (SCHWEINGRUBER 1990). Auf die häufigen Fraßattacken durch Insekten im Frühling und andere Störungen können die Bäume zwar mit Hilfe eines zweiten Austriebs Ende Juni (Johannistrieb) oder durch aktive Triebabstoßung bei übermäßigen Transpirationsverlusten reagieren (KRAHL-URBAN 1959; ROLOFF &

KLUGMANN 1997; ZIEGLER 2006), diese Maßnahmen sind aber mit dem Verbrauch von Energie verbunden. Zum Auffüllen der angegriffenen Reserven sind die Eichen auf sich möglichst schnell wieder einstellende günstige Wuchsbedingungen angewiesen. Zu einer echten Gefahr wird deshalb besonders die häufige Wiederkehr von Störungen oder Witterungsextremen (SCHRÖDER & BECK 2009).

Der Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Studien aus mehreren europäischen Ländern belegt zwar eine gewisse Varianz in den jeweils festgestellten dominierenden Schadfaktoren (FÜHRER 1998; SIWECKI & UFNALSKI 1998; SONESSON 1999; OSZAKO & DELATOUR 2000; THOMAS et al. 2002). Gemeinsam ist ihnen aber, dass das kombinierte Wirken von extremer Witterung und starkem Insektenfraß als Schlüsselfaktoren bei der Zuspitzung der Schäden in gesteigerter Mortalität benannt werden (LANDMANN et al. 1993; EICHHORN et al. 2005). Stellvertretend stellt Abb. 2-3 die von KÄTZEL et al. (2006) für das nordostdeutsche Tiefland benannten wesentlichen Zusammenhänge dar. Im Zentrum der Ursachen steht hier extreme oder wiederholte Sommertrockenheit in Verbindung mit wiederholtem Kahlfraß der Eichenkronen, verstärkend kommen Nährstoffungleichgewichte, starker Winterfrost sowie Spätfrostereignisse hinzu (THOMAS et al. 2002; OSZAKO 2004). In ungewöhnlich milden Wintern reduzieren die Bäume außerdem durch verstärkte Atmung ihre Nährstoffreserven, was sie wiederum anfälliger für Folgebelastungen macht (siehe oben). Bodenchemische Faktoren wie Versauerung können stressverschärfend wirken, indem sie die Wurzelvitalität und damit sowohl die Nährstoff- als auch die Wasseraufnahme hemmen (THOMAS & BÜTTNER 1998). Für einige dieser Beziehungen wie die zwischen Nährstoffungleichgewichten und Winterfrost lässt sich ihr Beitrag mit nur geringer Sicherheit nachweisen, für andere bestehen sehr deutliche Belege, zum Beispiel für die zuwachs- und vitalitätsreduzierende Wirkung von intensivem Insektenfraß (EICHHORN et al. 2005; MÖLLER et al. 2006).

Regional beziehungsweise standörtlich differenziert, zum Beispiel in England und Nordwestdeutschland, spielen pilzliche Pathogene wie *Phytophthora spec.* eine wichtige Rolle im Schadgeschehen, die für *Quercus petraea* unter nordostdeutschen Bedingungen jedoch nicht bestätigt wurde (KÄTZEL et al. 2006). Das gilt auch für die vor allem auf Standorten mit hohem Lehmanteil nachgewiesene Bodenverdichtung durch flächiges Befahren mit Forstmaschinen – die im Untersuchungsgebiet dominierenden Sandböden sind in dieser Hinsicht weit unempfindlicher. *Phytophthora* und Bodenverdichtung als Schadfaktoren sind außerdem vor allem in Bezug auf die Stiel-Eiche beschrieben worden, für die Traubeneiche wurden diese Einflüsse bisher nicht nachgewiesen (LEONHARD 2004; SCHUMACHER et al. 2006). Unsicherheiten bestehen über die Rolle xylobionter Käfer – der Eichensplintkäfer (*Agrilus biguttatus* FAB.) zum Beispiel wird von MORAAL & HILSZCZANSKI (2000) zu den primären Schaderregern gezählt (vergleiche auch BÄUCKER et al. 2010). MÖLLER et al. (2006) stellten noch keinen gesteigerten Beitrag dieser Art zum Schadgeschehen in Nordostdeutschland fest. Als gesichert kann gelten, dass die Tiere als Sekundärschädlinge geschwächte Bäume befallen und den Vitalitätsverlust verschärfen können.

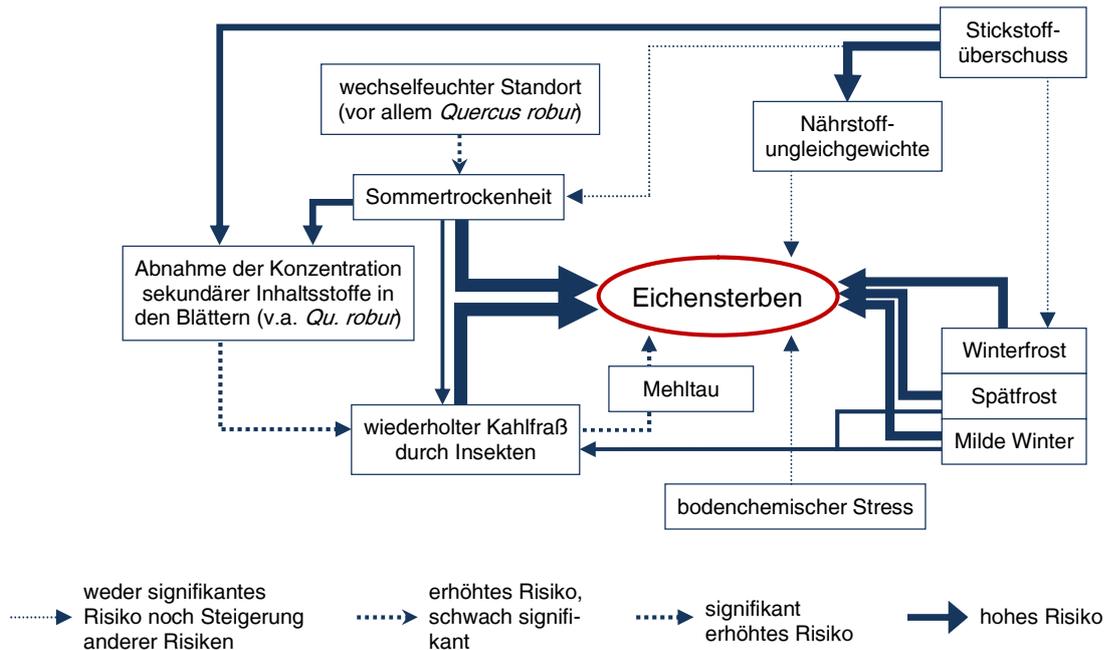


Abb. 2-3: Darstellung des Wirkens der wichtigsten Schadfaktoren, die zum Eichensterben beitragen, nach THOMAS et al. (2002) und KÄTZEL et al. (2006). Die Stärke der Pfeile steht für die Bedeutung des Einflussfaktors im Schadgeschehen.

Auch für Nordamerika beschreiben zum Beispiel WARGO (1996) sowie KABRICK et al. (2008) die grundsätzlich prädisponierende Wirkung nachteiliger Umweltbedingungen, die die Anfälligkeit für pilzliche Pathogene oder Schadinsekten erhöhen. Vor allem in Mittel- und Osteuropa sind tiefe Winterfröste gerade in Verbindung mit nachfolgenden Trockenperioden als Ursachen erhöhter Mortalität belegt (OSZAKO 2004). Eine zentrale Rolle in fast allen Modellen spielt der Wassermangel, der sich in der Pflanze als Trockenstress manifestiert (FÜHRER et al. 1998; BIGLER et al. 2006; DESPREZ-LOUSTAU et al. 2006; KIRILENKO & SEDJO 2007; MCDOWELL et al. 2008, MCDOWELL 2011, AREND et al. 2012).

Im Vergleich zum Normalzustand entsteht Trockenstress durch verringertes Wasserangebot, durch höheren Verbrauch oder durch eine Kombination von beidem (LARCHER 2001). Über die physiologischen Ursachen trockenstressbedingter Schäden gibt es eine Reihe von Erklärungsansätzen, die sich wie zum Beispiel bei BRÉDA et al. (2006) und HARTMANN (2011) in vergleichenden Studien auf zwei Gruppen von Hypothesen beziehen:

- (1) Die These vom "*hydraulic failure*" geht davon aus, dass es durch den Mangel an Wasser an einem bestimmtem Punkt zum katastrophalen Zusammenbruch der Wasserleitung im Xylem kommt, ähnlich den Embolien in Blutgefäßen (auch als "*cavitation*" bezeichnet); der Baum verdurstet demnach, weil nur noch ungenügende Wassermengen in den Blättern ankommen (BRÉDA et al. 2006; RYAN et al. 2006; CHOAT et al. 2012).
- (2) Die zweite Gruppe von Hypothesen geht von "*carbon starvation*" als ausschlaggebender Dysfunktion aus. Im Mittelpunkt steht die drastische Einschränkung der Kohlenstoff-

synthese als Folge des Stomataschlusses, der von der Pflanze als Schutz gegen übermäßige Verdunstung ausgelöst und dann zu lange aufrechterhalten wird. Durch den zunehmenden Mangel an Assimilaten kann es am Ende zum teilweisen oder vollständigen "Verhungern" kommen (MCDOWELL 2011).

Auf Grund der Ergebnisse einer Reihe von physiologischen Studien geht man davon aus, dass keiner dieser Prozesse allein zur Schädigung führt, ausgenommen bei extremen Konstellationen oder Laborbedingungen (SAXE et al. 2001). Stattdessen wird ein kombiniertes Wirken der beiden Prozesse angenommen, die über andere Mechanismen auch inhaltlich verbunden sind (HARTMANN 2011; MCDOWELL et al. 2008). Das Verhältnis der beiden Prozesse veranschaulicht Abb. 2-4. Insekten und andere biotische Pathogene können das Schadgeschehen nach diesem Modell verschärfen, aber durch den Trockenstress auch selbst in ihrer Wirkungsintensität verstärkt werden.

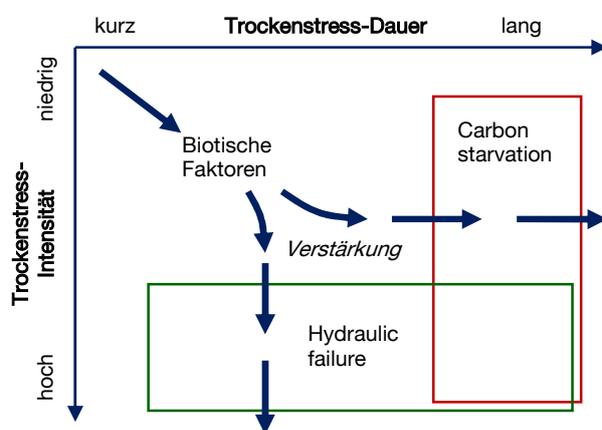


Abb. 2-4: Theoretische Beziehungen zwischen hydraulic failure und carbon starvation als Haupthypothesen trockenheitsbedingter Mortalität in Abhängigkeit von Dauer und Intensität des Trockenstress, der durch Insekten oder pilzliche Pathogene verstärkt werden kann (nach MCDOWELL et al. 2008, leicht verändert).

Ein Ausdruck der inhaltlichen Verbindung von trockenheitsbedingtem Versagen des Xylems und "Verhungern" durch Kohlenstoffmangel ist der ergänzende Erklärungsansatz vom symplastischen Versagen ("*symplastic failure*", RYAN et al. 2006). Danach schränkt der niedrige Wassergehalt im Gewebe bei Trockenstress den Metabolismus in den Zellen übermäßig ein und trägt damit zu erhöhter Anfälligkeit gegen Sekundärschäden bei, unter anderem deswegen, weil die zur Verteidigung benutzten Verbindungen besonders kohlenstoffreich sind¹ (MCDOWELL 2011). Wassermangel kann nach einer weiteren Hypothese ("*impeded translocation*") außerdem den Ferntransport der Photosyntheseprodukte im Phloem hemmen (SALA et al. 2010), die sich dann im Kronenbereich akkumulieren. Als Grund wird angenommen, dass der erhöhte Transpirationssog das Gleichgewicht zwischen der vertikalen Xylemspannung und der horizontalen Bewegung des Wassers vom Xylem ins Phloem hin zu ersterem verschiebt damit die geregelte Verteilung der Assimilate im Baum

¹ Dabei handelt es sich hauptsächlich um phenolische Verbindungen, Alkaloide, Tannine, Terpene und Glykoside, die neben der Abwehr von Pathogenen und Fraßfeinden auch eine Reihe weiterer Aufgaben erfüllen (HERMS & MATTSON 1992; LARCHER 2001).

beeinträchtigt. SALA & HOCH (2009) haben so auch mit der Baumhöhe steigende Konzentrationen sogenannter "nicht-struktureller" Kohlenwasserstoffe in den Kronen von *Pinus ponderosa* unter Trockenstress festgestellt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass es zahlreiche empirische Belege für trockenheitsbedingte Zuwachseinbußen und Mortalität nicht nur bei den heimischen Eichenarten gibt (SIWECKI & UFNALSKI 1998; THOMAS et al. 2002; ALLEN et al. 2010; SCHARNWEBER et al. 2011). Die konkreten Abläufe und Einflüsse auf physiologischer Ebene, die dafür verantwortlich sind, dass bestimmte Bäume unter Trockenstress absterben, während andere überleben, sind jedoch noch längst nicht bis ins Detail überzeugend geklärt (SALA 2009, SALA et al. 2010; MCDOWELL & SEVANTO 2010; HARTMANN 2011). Ebenso ist deutlich geworden, dass vor der Untersuchung konkreter Forschungsfragen auf diesem Gebiet eine eindeutige Begriffsklärung zu erfolgen hat, mit der sich der nächste Abschnitt befassen wird.

2.2 Theoretische Basis

2.2.1 Begriffsbestimmungen: Wachstum und Vitalität

Lebenslanges Wachstum in Form von Zellneubildung und Differenzierung gehört zu den elementaren Lebensäußerungen der Pflanzen (LARCHER 2001). Die Wachstumsvorgänge in hoch differenzierten, langlebigen Organismen wie Bäumen verlaufen auf sehr unterschiedlichen Ebenen, von der Bildung neuer Zellen an den Spitzen der Feinwurzeln bis zum komplexen Prozess des sekundären Dickenwachstums eines Stammes. Zu den besonderen Eigenschaften von Bäumen gehört es, dass sich Zellteilung und Differenzierungsprozesse nur in einigen Teilen des Organismus vollziehen können, während andere Teile dazu nicht mehr in der Lage sind und nur noch die statische Basis des Wachstums bilden. Auf diese Weise können Bäume enorme physische Dimensionen sowie hohe Lebensalter erreichen.

Das Wachstum der Bäume wird insgesamt gesteuert durch die Verfügbarkeit von Licht, Wasser und Nährstoffen (unterteilt in Makro- und Mikronährstoffe sowie Kohlendioxid), die Länge der Vegetationsperiode und das Wirken von Luftschadstoffen, biotischen und abiotischen Umweltfaktoren sowie die auftretenden Störungen (REHFUESS et al. 1999). Den Rahmen beziehungsweise das Potential für die ablaufenden Prozesse definiert die genetische Ausstattung eines Organismus (KÄTZEL 2008; FINKELDEY 2010) beziehungsweise sein "genetisches Programm" (MAYR 2000). Das spezifische Ausmaß und die Geschwindigkeit des Wachstums werden zusätzlich vom "Startzustand", das heißt den Reservestoffen und den Prägungen durch vorangegangenes Wachstum des Baumes, sowie von exogenen und endogenen Faktoren bestimmt, die während des Wachstums wirken (SCHWEINGRUBER 1996; PRETZSCH 2001).

Besonders gut lässt sich das Wirken der spezifischen Faktorenkombination am Zuwachs als erster Ableitung des Wachstums über der Zeit beobachten (WENK et al. 1990). Je nach betrachtetem Parameter sind in Waldökosystemen vor allem der Zuwachs des Volumens, der Grundfläche, der Höhe oder des Brusthöhendurchmessers von besonderer Bedeutung.

Intra- und interannuelle Zuwachsvariationen werden in einer Vielzahl von Untersuchungen als Indikatoren für Schwankungen in der Ausprägung der Umweltfaktoren sowie für ihre Wirkung auf den Baum genutzt. Vergleichsweise einfach ist es dabei, summarische statistische Zusammenhänge festzustellen (SCHWEINGRUBER 1996). Versucht man jedoch, mögliche kausale Beziehungen zu isolieren, dann werden die wissenschaftlichen Herausforderungen umso größer, je mehr man versucht, die komplexen Wirkungszusammenhänge in Einzelprozesse aufzulösen (REHFUESS et al. 1999).

Im Feld der Beziehungen zwischen Wachstum und Umwelt überlagern sich verschiedene zeitliche und ökophysiologische Skalenebenen, die gesondert zu berücksichtigen sind (LARCHER 2001; VAGANOV et al. 2006; BECK 2007). Zu den endogenen Einflussgrößen gehört das Alter, das auf artspezifische Weise das individuelle Wachstumspotential im Zeitverlauf prägt: Je nach den ökologischen Ansprüchen einer Baumart und nach der konkreten Konkurrenzkonstellation sind mit zunehmendem Alter unterschiedlich deutlich ausgeprägte Zuwachsminderungen sowohl im Stammdurchmesser als auch in der Baumhöhe zu erwarten (ROLOFF 1985; RYAN et al. 2006; FISH et al. 2010). Als exogene Einflüsse auf das Wuchsverhalten sind zum Beispiel die Standortsqualität (Nährstoff- und Wasserversorgung) zu nennen sowie die Einflüsse anderer Mitglieder der Population beziehungsweise des Bestandes (BERGER et al. 2004). Im Fall länger nachwirkender Effekte wie der langsamen Erholung nach starken Fraßschäden durch Insekten wird deutlich, dass sich die beiden Gruppen von Einflüssen oft nicht sauber unterscheiden lassen, sondern in ihrem Wirken auf den Zuwachs und auch auf die Vitalität im Zusammenhang zu sehen sind (DOBBERTIN et al. 2007).

Die Vitalität von Einzelbäumen und Beständen ist im forstlichen und waldökologischen Kontext verstärkt in den Blickpunkt gerückt, seit sich anthropogene Schädigungen an Waldbäumen lokal gehäuft beobachten lassen und merklichen Einfluss auf die Funktionserfüllung der Wälder ausüben. Vor rund einhundert Jahren zum Beispiel stellte man in Sachsen erste "Rauchschäden" an Fichten und Tannen als Folge von Immissionen fest, die aus dem Bergbau und der Erzverhüttung stammten (HASEL & SCHWARTZ 2006). In den Beständen traten seitdem immer wieder deutlich erhöhte Mortalitätsraten auf, die verbleibenden Bäume zeigten ein eingeschränktes Wachstum, das mit Einbußen beim Holzertrag verbunden war (NEBE et al. 1998). Den flächigen Verlusten durch Absterben und dem Zuwachsrückgang versuchte man in den 1980er Jahren durch den Anbau von Bäumen oder Baumarten mit höherer "Rauchhärte", das heißt stärkerem Widerstandsvermögen gegen Luftschadstoffe, zu begegnen. Auch in anderen Regionen Deutschlands und Europas traten Ende des zwanzigsten Jahrhunderts deutliche Schäden bis hin zum Absterben ganzer Bestände (wie zum Beispiel im Westharz, OTTO 1994) auf, die auf die Schwächung der Bäume durch einen Komplex aus Bodenversauerung, Insektenbefall und schädlichen Immissionen zurückgeführt wurden (STERBA 1996)¹.

¹ Nach umfassender Analyse der Situation kommt diese Studie zu dem Schluss, dass trotz verbreitet als negativ eingeschätzter Kronenvitalität in den 1980er Jahren die Zuwachseleistungen seit Mitte des 20. Jahrhunderts nicht in vergleichbarem Maß zurückgegangen sind, sondern zum Teil sogar zugenommen haben.

Seit dieser Zeit der Debatten um Inhalt und Ausmaß des "Waldsterbens" steht der Begriff der "Vitalität" an zentraler Stelle, wenn über den Zustand und die Perspektiven von Bäumen, Waldbeständen oder Baumarten diskutiert wird (SCHMID-HAAS 2002). Seine Definition beziehungsweise Abgrenzung ist auf verschiedenen Wegen möglich. Die in der Literatur zu findenden Begriffsbestimmungen verstehen Vitalität in der Regel als akkumulierende Größe, das heißt nicht als direkt messbares Merkmal, sondern als komplexen Ausdruck der Wechselwirkungen zwischen den Lebensumständen und der individuellen ökophysiologischen Leistungsfähigkeit (OTTO 1994; KÄTZEL 2003; DOBBERTIN 2005). Vitalität kann sowohl einen Ausgangszustand beziehungsweise eine Bedingung als auch eine Folge oder ein Ergebnis dieser Wechselwirkungen sein. Gemeinsamer Bezug bei Vitalitätsbetrachtungen sind die Auseinandersetzungen von Organismen und Populationen mit ihrer Umwelt und das daraus resultierende Maß, in dem die Lebensfunktionen wie Stoffwechsel, Wachstum oder Vermehrung realisiert werden können (SCHMID-HAAS 2002). Die Quantifizierung erfolgt dabei nicht nach dem "entweder-oder"-Prinzip, sondern in Form einer kontinuierlichen Verteilung, in der vor allem das Unterschreiten ihrer unteren Grenze, das heißt des Vitalitätsminimums, als Absterben relativ leicht feststellbar ist. Eine obere Grenze der Vitalität lässt sich dagegen wesentlich schwieriger definieren (DOBBERTIN 2005); ein Maximum ist zum Beispiel dann erreicht, wenn die physiologischen Abläufe auf einem zur Überlebenssicherung optimalen Niveau liegen und bestmögliche Voraussetzungen zur Nutzung externer Ressourcen bestehen (siehe unten).

Die einzelnen Definitionen von Vitalität lassen sich danach unterteilen, welche Funktion der physiologischen Leistungsfähigkeit in den Vordergrund gestellt wird. Eine eher "offensiv" ausgerichtete Variante betont Vitalität als grundlegende Eigenschaft, die es einem Organismus erlaubt, die ihm zur Verfügung stehenden Ressourcen optimal auszunutzen, um seine Entwicklung voranzutreiben oder auch seinen Stand im Ökosystem zu erhalten und auszubauen (ROLOFF 1993; ROLOFF & KLUGMANN 1997). Eine im Vergleich eher defensive Art der Definition versteht Vitalität als Fähigkeit eines Organismus oder einer Population, Belastungen bzw. Stress zu ertragen (TESCHE 1991; TISCHLER 1993). Nach KÄTZEL (2003) fasst diese zweite Begriffsbestimmung die Prozesse von Wachstum (Biomasseproduktion), Vermehrung sowie Abwehr ungünstiger Umwelteinflüsse, die zur erfolgreichen Bewältigung von Stress nötig sind, am besten zusammen und ist deshalb geeignet, den komplexen Begriff handhabbar zu machen.

Die unterschiedlichen Definitionsmöglichkeiten werden an zwei Begriffen deutlicher, die zum Teil als Synonyme für Vitalität benutzt werden, aber eher die "äußeren Enden" der Interpretation des Begriffs kennzeichnen: Zum einen wird besonders in der englischsprachigen Literatur der Begriff "*vigor*" verwendet, um die Wuchskraft oder Wuchspotenz einer Pflanze im Sinne der Durchsetzungsfähigkeit gegen externe Beschränkungen zu beschreiben (PEDERSEN 1998; STONE et al. 2010; HARTMANN 2011). Diese Wuchskraft ist im Wesentlichen genetisch geprägt und unterliegt "vorprogrammierten" Veränderungen im Verlauf des Baumlebens (DOBBERTIN 2005), die zum Beispiel mit einem Nachlassen der Reaktionsfähigkeit der Krone auf veränderte Umgebungsbedingungen im Alter verbunden sind

(ROLOFF 1993). Im Kontrast dazu bezeichnet der Begriff der "*viability*" die Lebensfähigkeit beziehungsweise das Überlebensvermögen – oft auch bezogen auf Populationen – unter Bedingungen, die es gestatten, die wesentlichen Lebensfunktionen aufrechtzuerhalten (MENGES 2000; SCOTTI 2010). Hier steht vor allem die individuelle Interaktion der Bäume mit einer Umgebung im Vordergrund, die sich im Verlauf der Zeit immer wieder ändern und damit neue Herausforderungen an die Anpassungsfähigkeit der Organismen und Populationen stellen kann (KÄTZEL 2008, FINKELDEY & HATTEMER 2010).

Die Suche nach einer handhabbaren Definition zeigt, dass die Vitalität eines Organismus wesentlich in ihrer Beziehung zu störenden, antagonistischen Einflüssen charakterisiert werden kann. Diese nachteiligen Einflüsse auf das physiologische Funktionieren lassen sich in einem Kontinuum zwischen den Begriffen "Störung" und "Stress" anordnen. Beide können nicht trennscharf voneinander abgegrenzt werden und überlagern sich zum Teil in ihrer theoretischen Definition, wobei Störungen eher durch vergleichsweise kurzes, aber intensives Wirken, Stress dagegen durch eine längere Präsenz gekennzeichnet sind. Darüber hinaus wird im Folgenden "Stress" als physiologische *Reaktion* auf individueller Ebene verstanden, die in Erwiderung auf von außen wirkende Faktoren mit einem bestimmten zeitlichen Horizont abläuft¹. Der Begriff "Störungen" fasst dagegen diese äußeren *Einwirkungen* auf Organismen, Populationen und Ökosysteme zusammen: Störungen verursachen somit Stress, sind aber nicht seine einzige Ursache. Die beiden Größen sollen näher betrachtet werden, um den Kontext der Vitalitätsanalysen und die Bezugsbasis für das Verständnis der abgeleiteten Aussagen klarer zu machen.

2.2.2 Störungen, Stress und Krankheiten

Im dynamischen Beziehungsgefüge von Waldökosystemen werden Ereignisse und Prozesse, die die langfristige Entwicklung zurückwerfen, einzelne Elemente oder den Wald insgesamt schädigen beziehungsweise die inneren Abläufe unterbrechen, als "Störungen" bezeichnet. In der Literatur findet sich der Begriff zum Teil eher im Zusammenhang mit kurzfristigen Phänomenen ("*disturbances*", Störungen im engeren Sinne). Für Vorgänge mit längerer Dauer wird in Abgrenzung dazu auch der Begriff "*strain*" (oder "Belastung") verwendet (HEINIMANN 2010), diese Trennung ist hier jedoch nicht vorgesehen.

In hochkomplexen Systemen treten Störungen zwangsläufig auf (sie sind "systemimmanent"), ihre Frequenz, ihre Wahrscheinlichkeit und die Stärke ihrer Wirkungen hängen von der Beschaffenheit des Waldes und seiner Umwelt ab. Vom Baum her gesehen handelt es sich dabei in der Regel um einzeln, parallel oder in "Störungsketten" auftretende Einwirkungen von außen (OTTO 1994, WAGNER 2004). Neben spontanen Störungen, zu denen vor allem extreme Wetterereignisse, Insektenmassenvermehrungen oder Waldbrände gehören, gibt es auch kausale ("innere") Störungen, die aus synökologischen Interaktionen oder

¹ Den Begriff "Stress" verwenden viele Autoren auch zur Beschreibung der Wirkungen von außen auf Organismen (BRAUN 1982; TESCHE 1991; PEDERSEN 1998; GEYER et al. 2011; HARTMANN 2011).

menschlichen Eingriffen resultieren¹. Kausale Störungen stellen bei etwa gleichbleibenden externen Einflüssen, wenn die inneren Funktionen in der Balance sind, ein latentes Risiko dar. Sie entfalten ihr Potential vor allem dann, wenn wichtige Umweltfaktoren zu stark von ihren langfristigen Mittelwerten abweichen (OTTO 1994).

Die während der langen Lebensdauer vieler Bäume immer wieder vorkommenden Störungen müssen jedoch nicht nur negative Wirkungen haben. Über viele Generationen hinweg passen sich das betroffene Ökosystem und die einzelnen Arten an Typ und Rhythmik dieser Störungen an: Bestimmte Baumarten in semiariden Gebieten sind zum Beispiel für eine erfolgreiche Verjüngung auf Waldbrände angewiesen, andere Störungen können ein stabiles Gleichgewicht aufbrechen, das die Entwicklung des Gesamtsystems hin zu mehr Artenvielfalt und Leistungsfähigkeit hemmt. Sind die störungsinduzierten Schwankungen der Umweltfaktoren nur gering, dann kommt es zu keiner Beeinträchtigung der wesentlichen Abläufe im Waldökosystem. Das andere Extrem bilden Störungen wie Vulkanausbrüche oder Insektenkalamitäten, die zu katastrophenartigen Zusammenbrüchen großer Waldgebiete führen können. Die konkrete Wirkung ergibt sich aus der Kombination des Zeitpunkts der Störung mit ihrer Intensität und wird von weiteren Einflussfaktoren wie dem möglichen parallelen Auftreten anderer Schadeinflüsse sowie der Konstitution des Ökosystems oder auch der einzelnen Bäume modifiziert.

In Abgrenzung zu externen Einflüssen werden die im Inneren eines betrachteten Systems ablaufenden Reaktionen auf Belastungen von außen, die zu einem Abweichen vom Normalverhalten führen, als "Stress" definiert. Nach KÄTZEL (2003) liegt ein "Normalverhalten" vor, wenn "kontinuierliche Entwicklungen ablaufen sowie Wachstum und Vermehrung bei Ausschöpfung der individuellen Reaktionsnorm möglich sind". Da es bei Betrachtung hinreichend langer Zeiträume keine Ökosysteme ohne Störungen gibt, ist Stress eine mehr oder weniger ständige Begleiterscheinung für deren Existenz und Funktionieren (LARCHER 2001; GEYER et al. 2011). Der Begriff stammt ursprünglich aus der Humanmedizin, hat sich aber seit Beginn der 1980er Jahre vor allem für die Analyse der "neuartigen Waldschäden" beziehungsweise des "Waldsterbens" fest in der Ökosystemforschung etabliert (TESCHE 1991).

Nach der dominierenden Stressursache wird häufig unterschieden zwischen "Trockenstress", "Hitzestress", "Kältestress", Stress durch Ungleichgewichte in der Nährstoffversorgung oder übermäßige Belastung durch Salze. Die dabei wirkenden Störeinflüsse werden als "Stressfaktoren" oder "Stressoren" bezeichnet (GALLOPÍN 2006; RENNENBERG et al. 2006; DELANGE et al. 2010; MATYSSEK et al. 2010)². Auf der höchsten Hierarchieebene, dem Organismus, äußert sich Stress meist durch unspezifische Reaktionen, die keine direkten

¹ Oft bestehen enge Zusammenhänge zwischen spontanen und kausalen Störungen: Schafft man zum Beispiel durch starke und rasche Auflichtung eines dichten Kiefernjungbestands viel Wuchsraum für Bäume mit langen, schlanken Stämmen und kurzer Krone, wie sie durch den Dichtschluss vorher entstanden sind, dann besteht ein deutlich erhöhtes Risiko für Schäden durch Schneedruck oder Stürme so lange, bis sich die verbleibenden Bäume durch längere Kronen und niedrigere h/d-Werte stabilisiert haben.

² Eindeutiger wäre es, für die externen Einflüsse konsequent die Bezeichnung "Belastung" bzw. "*strain*" zu verwenden (HEINIMANN 2010). Nach GALLOPÍN (2006) wäre auch die Bezeichnung "Druck" ("*pressure*") denkbar.

Parallel zur Definition von Stress werden Abweichungen vom normalen Funktionieren, die auf das Wirken von "*persistent agents*" in der Umgebung der Pflanze zurückzuführen sind, nach MANION (1981) als "Krankheit" bezeichnet. Diese biotischen oder abiotischen Einflüsse zeichnen sich durch eine gewisse Zeitdauer aus, die in Kombination mit ihrer Dosis oder Stärke die Reaktion des Organismus hervorruft. In Abgrenzung zum Stress äußern sich Krankheiten meist sehr spezifisch, an den Reaktionen (Krankheitserscheinungen) zum Beispiel eines Baumes lässt sich häufig ablesen, welcher Krankheitserreger ihn befallen hat. Krankheiten sind abzugrenzen von "Verletzungen", die durch einen einmaligen, sehr kurzfristigen Impuls von außen entstehen, etwa in Form abbrechender Äste bei übermäßiger Schneelast oder als Rindenwunden am Stammanlauf durch nicht sachgemäßen Holzabtransport. Treten durch solche Wunden Pilze in das Stamminnere ein, so kann dieser biotische Erreger wiederum langfristige Krankheiten des betroffenen Baumes hervorrufen.

Krankheiten lösen mindestens kurzfristig Stress aus, der sich bei erfolgloser Abwehr oder Bekämpfung sowie bei fortdauerndem Einwirken der Krankheitsursache auch zu chronischem Stress verschärfen kann. In Ausnahmefällen einzelne, meist aber mehrere in Kombination auftretende Schadfaktoren können in ihren Wirkungen so stark werden, sich gegenseitig verstärken oder auch eine Stabilisierung des Baumes so weit verhindern, dass dieser schwere Krankheitssymptome bis hin zum Absterben zeigt. Diese "Komplexkrankheiten" sind auch unter dem Namen "*Decline*" bekannt und werden mit dem "Sterben" verschiedener Baumarten in Zusammenhang gebracht (TESCHE 1991; EISENHAUER 1991; BIGLER et al. 2006; KABRICK et al. 2008).

Das charakteristische Zusammenwirken von biotischen und abiotischen Einflüssen in Komplexkrankheiten hat MANION (1981) durch ein spiralförmiges Schema anschaulich dargestellt (Abb. 2-6). In diesem Konzept führen *prädisponierende* Faktoren zu einer erhöhten Anfälligkeit für *auslösende* Faktoren, die ein Krankheitsgeschehen in Gang setzen, das durch *begleitende* Faktoren verschärft oder überprägt wird. Während die auslösenden Einflüsse oft kurzfristig oder einmalig auftreten, sind sowohl prädisponierende als auch Begleitfaktoren mittel- bis langfristige Phänomene. Im Organismus nimmt während des Krankheitsverlaufs der Stress zu und die physiologischen Abläufe werden zunehmend eingeschränkt oder laufen anormal ab. Eine Stabilisierung oder Rückkehr zum normalen Funktionieren wird immer schwieriger, ist aber nicht ausgeschlossen, wenn der Druck der Schadfaktoren abnimmt oder die Belastung als Eustress wirkt (siehe oben) und zu Anpassungsreaktionen im Organismus, in der Population beziehungsweise im Ökosystem führt.

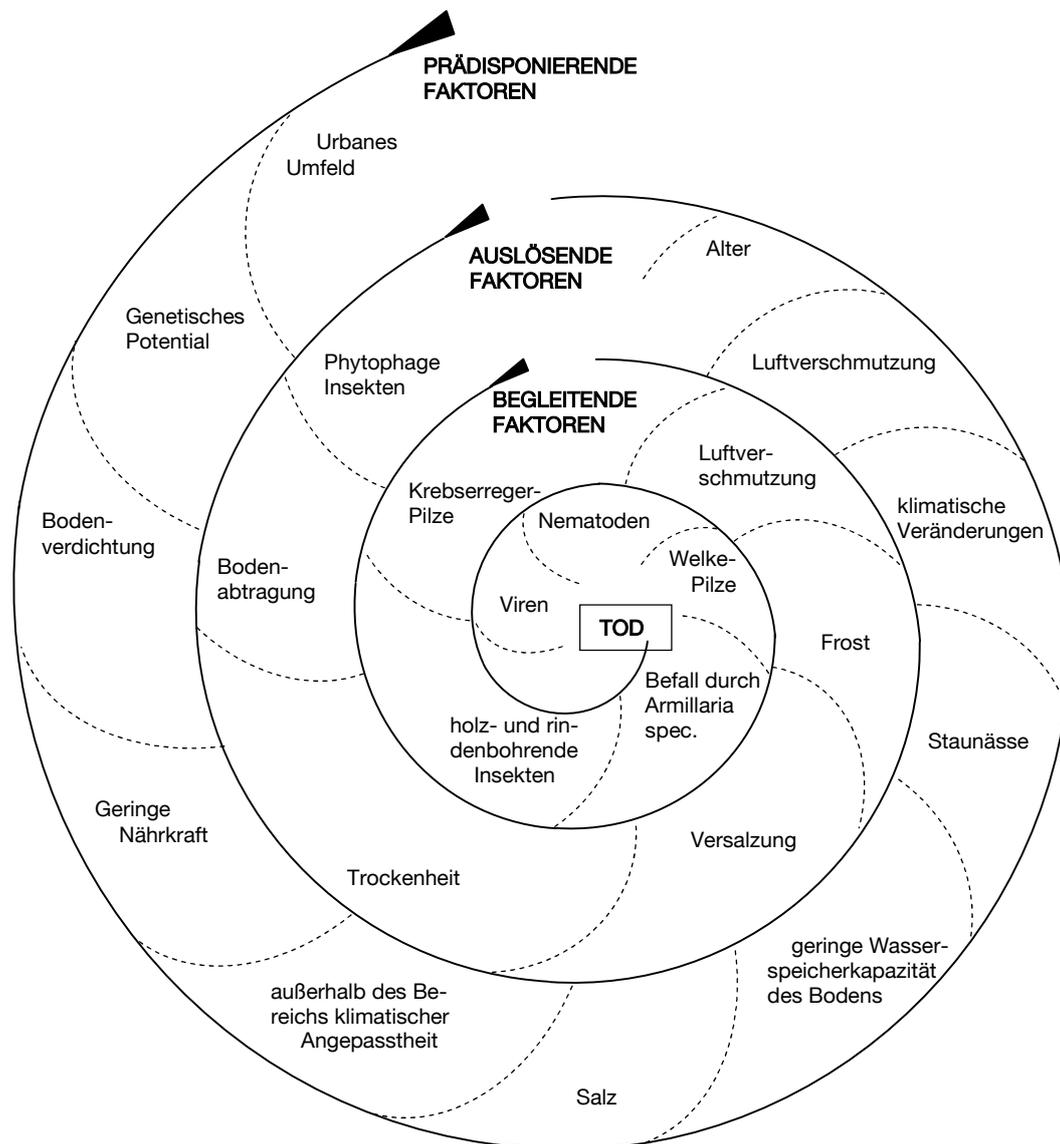


Abb. 2-6: Verlaufsspirale von Komplexkrankheiten mit prädisponierenden, auslösenden und begleitenden Faktoren nach MANION (1981, leicht verändert)

Der physiologische Hintergrund für die im Kampf gegen die Stresswirkungen zunehmende Schwächung eines Baumes liegt darin, dass der Organismus dabei quasi notgedrungen auf die Reserven an Kohlenwasserstoffen zurückgreift, die eigentlich dafür vorgesehen sind, das Wachstum zu Beginn der nächsten Vegetationsperiode in Gang zu bringen und mögliche Schäden an der Belaubung zu reparieren (MANION 1981). Fortdauernde Belastungen führen zu einer Erschöpfung dieser Vorräte und damit zu schwindenden Fähigkeiten sowohl zur Regeneration von Assimilationsorganen als auch zur Verteidigung gegen Parasiten und Pathogene. In welchem Maße die einzelnen Bäume dadurch letztendlich entweder absterben oder überleben, ist von ihren genetischen Voraussetzungen und von den während ihres Lebens erworbenen Möglichkeiten abhängig, sich an die Frequenz, Intensität und Dauer der Belastungen anzupassen.

2.2.3 Anpassung und Stabilität

Das Verhalten von Einzelbäumen und Beständen unter veränderlichen Umweltbedingungen wird mit einer Reihe von Begriffen beschrieben, hinter denen je nach Bezugsrahmen und Untersuchungsebene unterschiedliche Inhalte stehen. Die folgenden Definitionen orientieren sich am Verständnis von Waldbeständen als Ökosystem, wie es zum Beispiel OTTO (1994) oder PETERSON et al. (1998) formulieren, sowie an den Begriffsbestimmungen von ULRICH (1991). Vor diesem Hintergrund wird zum Beispiel unter *Stabilität* eher ein *Zustand* als ein Prozess oder ein Vermögen verstanden. Stabilität wird erreicht und gegebenenfalls erhalten bei Vorliegen einer bestimmten Summe innerer Eigenschaften, die dieses System¹ unter Einfluss von Außenwirkungen im Wesentlichen so bleiben lassen, wie es ist. Auch unter dem Druck von Störungen bleibt ein stabiler Wald demnach in etwa unverändert (OTTO 1994).

Nach dieser Art der Definition ist Stabilität eng mit dem Konzept des "*steady state*" verbunden, der dadurch entsteht und gehalten wird, dass ein Gleichgewicht aller Kräfte herrscht, die auf das System wirken (LUDWIG et al. 1997). Ein solcher Zustand ist in Ökosystemen nur selten und zeitlich begrenzt gegeben. Gleichgewichte in Wäldern sind vorrangig als dynamisch und nicht als statisch zu betrachten (HOLLING 1973; KRAMER 2007; HEINIMANN 2010). Der Stabilitätsbegriff schließt deshalb auch hier eine beständige Oszillation um einen mehr theoretischen als tatsächlich zu beobachtenden Schwerpunkt ein, der als Bezugspunkt zur Abschätzung des Ausmaßes von Abweichungen trotzdem zu beachten ist (HOLLING 1973; OTTO 1994).

Ein vereinfachendes Modell soll die Begrifflichkeiten verdeutlichen: In Abb. 2-7 kennzeichnen die Positionen 1, 2 und 3 jeweils stabile Zustände einer Kugel in einer Reihe von verbundenen Mulden (vergleiche auch BLATT et al. 2010). Stabilität ist für diese Positionen anzunehmen, weil die Kugel nach äußeren Einwirkungen, die sie aus ihrer Lage nach links oder rechts verschieben, wieder zur Mittelpunktlage zurückkehrt. Auf den Wald bezogen wird die Fähigkeit des Systems, nach Störungen die ursprüngliche, ausbalancierte Situation wieder zu erreichen, als *Elastizität* bezeichnet (OTTO 1994). Dieses Ausgleichen störender Einflüsse kann auch als Pufferung verstanden werden und ist abhängig von der Widerstandskraft des Individuums oder der Population. Als Maß für die Elastizität lässt sich der Unterschied zwischen dem *steady state* (wie in Position 1) und dem Scheitelpunkt der Muldenwände ansehen: Veränderungen der Umwelt bis zu dieser Grenze kann das System über kurz oder lang kompensieren und seine stationäre Ausgangslage (mindestens ungefähr) wieder erreichen. Die Auslenkung der Kugel von Position 1 zum Beispiel zu Position 4, also die Stärke der Reaktion auf externe Faktoren, wird hier im Gegensatz mit der Elastizität als "*Sensitivität*" bezeichnet (Abb. 2-7). Sind die Störungen so stark oder die Sensitivität so hoch, dass die Grenzen der aktuellen Elastizität überschritten werden, dann kann sich das System auf einem anderen Stabilitätsniveau neu einschwingen: Die Kugel des Modells

¹ Unter "System" lässt sich für die folgenden Betrachtungen auch ein Einzelbaum verstehen, der mit seinen vielfältigen Organen und seiner Eingebundenheit in die Umwelt ein Ökosystem auf kleinerer Ebene darstellt.

gelangt in benachbarte Mulden und oszilliert dort um die Gleichgewichtszustände 2 oder 3. Hinsichtlich der Eigenschaften des Ökosystems beziehungsweise der Vielfalt und der Funktionserfüllung des Waldes kann die neue Konstellation vergleichbar der alten sein (Positionen 1 und 2) oder auf einem niedrigeren Level liegen (1 und 3). Erneute größere Störungen lassen auch eine Rückkehr zum Zustand 1 zu, die Widerstände dagegen, also Stabilität und Elastizität im "neuen" System, sind jedoch im Zustand 3 größer als im Zustand 2.

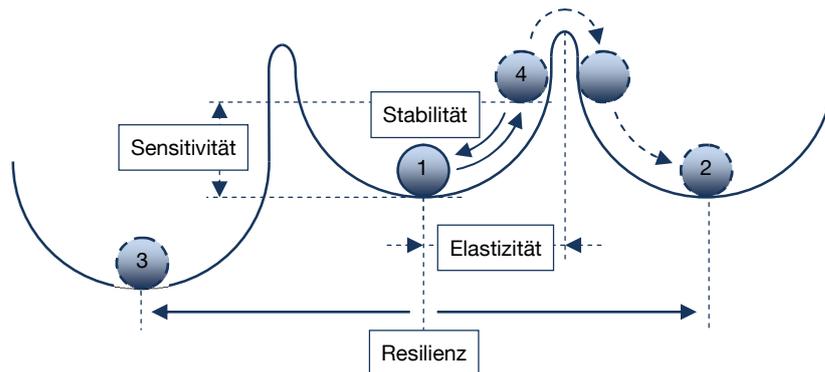


Abb. 2-7: Mögliche Reaktionen eines Systems auf sich verändernde Bedingungen beziehungsweise auf externe Einwirkungen, verdeutlicht am Bild einer Kugel in schüsselartigen Mulden (Modell nach PETERSON et al. 1998; Erläuterungen im Text)

Die gerichtete Transformation des Systems hin zu einem anderen Gleichgewichtsniveau bei Bewahrung seiner grundlegenden Eigenschaften wird mit ULRICH (1991) als *Resilienz* bezeichnet. Eine derartige Verschiebung tritt zum Beispiel ein, wenn durch Pathogene oder einseitigen Nutzungsdruck zwar bestimmte Baumarten aus einem Bestand ausscheiden, das Ökosystem Wald jedoch in veränderter Artenkonstellation erhalten bleibt (BOLTE et al. 2010). Die Grenze der Resilienz des Ökosystems "Wald" ist erreicht, wenn durch entsprechende Störungen ein wesentlich funktions- und diversitätsärmerer Systemzustand entsteht. Als Beispiel einer solchen störungsinduzierten Verschiebung sei die permanente Belastung durch Luftschadstoffe genannt, die zum Absterben und Zusammenbruch ganzer Waldbestände führt, an deren Stelle sich danach geschlossene Grasdecken ausbilden, die eine Wiederansiedlung von Baumarten stark erschweren (OTTO 1994).

Verschiedene Autoren besonders aus dem englischsprachigen Raum setzen Resilienz gleich mit Elastizität (KRAMER 2007; LLORET et al. 2011), besonders bei der Betrachtung statischer Gleichgewichte. HOLLING (1973) zum Beispiel definiert Resilienz als Maß für die Fähigkeit eines Systems, Veränderungen seiner Variablen und Parameter zu absorbieren, ohne dass die Beziehungen zwischen den Systemelementen verloren gehen. Wendet man diese Begriffsbestimmung auf einer höheren zeitlichen oder räumlichen Ebene an, dann handelt es sich bei resilienten Systemen quasi um Elastizität des Gesamtsystems in Bezug auf eine übergeordnete Skala (PETERSON et al. 1998; HOLLING 2001). Gerade in übergreifenden Be-

trachtungen, die die Möglichkeiten des Managements komplexer Systeme angesichts eines Wandels der Umweltbedingungen ausloten, hat der Begriff der Resilienz enorm an Bedeutung gewonnen (DELANGE et al. 2010; HEINIMANN 2010). Kennzeichnend für dieses Verständnis ist der schon erwähnte dynamische Begriff von Stabilität, nach dem es keine konstanten Gleichgewichtszustände gibt, denen ein System aus jeder denkbaren Lage immer wieder zustrebt. Stattdessen kann es mehrere, auch neu entstehende Positionen (siehe Abb. 2-7) geben, in denen sich die das Ökosystem treibenden Faktoren in ihren Wirkungen annähernd aufheben und sich temporäre Gleichgewichte einstellen (HOLLING 2001).

Ein Beleg für die hohe Resilienz gerade von Waldökosystemen ist die von OTTO (1994) beschriebene "multivariable Sukzessionsdynamik" in Naturwäldern. Wegen der langen Generationszyklen von Waldbäumen und der vielfältigen Störungen beziehungsweise Unwägbarkeiten ("Imponderabilien"), die im Laufe der Zeit eintreten können, lässt sich kein einheitlicher "Zielzustand" angeben, der mit Sicherheit erreicht würde und der sich durch sein harmonisches Gleichgewicht der wirkenden Kräfte auszeichnete. Stattdessen pendelt das System um verschiedene zeitweilig stabile Zustände, die durch ein Set grundlegender Eigenschaften verbunden sind. Ab einer gewissen räumlichen Ausdehnung bildet sich wegen der begrenzten örtlichen Wirksamkeit von Störungen außerdem ein Mosaik nebeneinander bestehender Ausschnitte der Sukzessionsdynamik. Auf noch höherer Abstraktionsebene schließt sich das Konzept der Resilienz an die Theorie des "*punctuated equilibrium*" an, die nach GOULD & ELDREDGE (1977) die am besten geeignete Beschreibung von Evolutionsprozessen ist.

Systeme mit einem hohen Maß an Resilienz sind meist auch durch ein überdurchschnittliches Anpassungsvermögen gekennzeichnet, das sich im Detail aus den Elementen Anpassbarkeit, Anpassung und Anpassungsfähigkeit zusammensetzt (KÄTZEL 2008; HEINIMANN 2010). Mit Bezug auf Populationen wird hier unter Anpassbarkeit der aktuelle Grad an Übereinstimmung zwischen den Lebensbedingungen und den individuell basierten Fähigkeiten verstanden, auf "gewöhnliche" Schwankungen der Umgebungsverhältnisse zu reagieren. Mit Anpassung ist der Prozess des "Sich-Einstellens" von Organismen, Arten oder Lebensgemeinschaften auf Veränderungen ihrer Lebensbedingungen gemeint. Er kann einerseits (während eines Lebens) auf *modulative* (Stellung von Blättern zum Licht) oder *modifikative* (Entwicklung von Licht- und Schattenblättern) Weise stattfinden. Auf feineren Hierarchieebenen laufen meist noch eher *physiologische* Anpassungsprozesse ab wie zum Beispiel die Anreicherung osmotisch wirksamer Verbindungen im Eichenblatt bei beginnendem Trockenstress (KÄTZEL & LÖFFLER 2006). *Evolutionäre* Anpassung verläuft demgegenüber über mehrere Generationen und ist mit Veränderungen im Genom verbunden (KÄTZEL 2008; GAILING et al. 2010). Zu beachten ist die dialektische Verbindung zwischen den Anpassungsprozessen auf Ebene der Organismen und der Anpassung der Population als Ganzes: Während einzelne Bäume auf Grund mangelnder Fitness absterben können, steigt durch die anteilmäßig höhere Vermehrungschance für die Überlebenden das Anpassungsvermögen des Gesamtbestandes beziehungsweise der Population. Aus der Einbindung

der Individuen in das Bestandesgefüge ergibt sich in Form der sozialen Beziehungen eine zusätzliche Einflussebene auf die Möglichkeiten und den Erfolg der Anpassung.

2.2.4 Soziale Interaktionen

Die sozialen Interaktionen zwischen Individuen einer Population (beziehungsweise Bäumen eines Bestandes) bilden den modifizierenden Rahmen für Störeinflüsse, wirken aber auch aktiv auf Wachstum und Vitalität. Das Spektrum der möglichen Wirkungen auf die individuelle Ressourcenverfügbarkeit reicht von Konkurrenz als Beschränkung über Symbiosen, die vor allem interspezifisch auftreten, bis zu Kooperation und "Facilitation" als Erscheinungen, die die gemeinsame Nutzbarmachung von Umweltfaktoren vereinfachen oder sogar erst ermöglichen (GOULD 1988; OTTO 1994; CALDWELL et al. 1998; PRETZSCH et al. 2010).

– Konkurrenz in Waldökosystemen –

Die Stellung eines Baumes im soziologischen Gefüge des Bestandes bildet eine der Voraussetzungen dafür, in welchem Maße er Zugang zu den physiologisch relevanten Ressourcen hat, diesen bewahren oder auch ausbauen kann. In Waldökosystemen konkurrieren die Baumindividuen miteinander und mit anderen Organismen um die für Wachstum und Entwicklung notwendigen Ressourcen wie Nährstoffe, Wasser und Licht. Nach den verschiedenen Bezugsebenen lassen sich Konkurrenz und ihre Wirkungen wie folgt gliedern (KIMMINS 1987; BEGON et al. 1990; OTTO 1994):

- räumlich: horizontale und/oder vertikale Konkurrenz bzw. Konkurrenz im Kronen- oder im Wurzelraum;
- zeitlich: "status-quo-"Konkurrenz und/oder Durchsetzungskonkurrenz; konstante oder dynamische Konkurrenzverhältnisse;
- artbezogen: interspezifische und/oder intraspezifische Konkurrenz;
- ressourcenbezogen: Konkurrenz um Licht, um Wasser, um Nährstoffe.

Die verschiedenen Konkurrenzebenen treten in einer konkreten Situation meist kombiniert miteinander auf. Die konkrete Ausprägung dieser Mischung hängt davon ab, welches Individuum oder welche Gruppe im Mittelpunkt der Betrachtung steht, welche Organismen als Konkurrenten beteiligt sind und wie der Standort bzw. das Ökosystem mit Ressourcen ausgestattet ist. Im Fokus steht in waldökologischem Kontext meist der "Zentralbaum" (englisch "*subject tree*"), manchmal auch eine Gruppe bzw. Schicht von Bäumen, zum Beispiel die Voranbauschicht in einem zweischichtigen Bestand (NOACK 2009). Die Bedeutung der einzelnen Konkurrenzebenen verändert sich in der Regel mit der Zeit, zum einen wegen des Wachstums der Lebewesen, zum anderen wegen der Vorgänge des Entzugs oder der Neuproduktion in der unbelebten Sphäre des Systems. Dazu kommen die Varianz in den übergeordneten Ebenen wie zum Beispiel Klimaänderungen sowie der menschliche Einfluss.

Die Effekte dieses komplexen Geflechts von Wechselwirkungen lassen sich an der Konkurrenzstärke eines Organismus oder einer Art ablesen. Zu ihrer Quantifizierung sind verschiedene Ansätze entwickelt worden (CANNELL & GRACE 1993; OTTO 1994, BACHMANN 1998). Im Kontext dieser Untersuchung gilt ein Element des Ökosystems dann als besonders konkurrenzstark, wenn es zum einen den Spielraum bzw. den Ressourcenverbrauch durch andere begrenzen kann und zum anderen selbst Zugang zu mehr Ressourcen hat als seine Nachbarn (Abb. 2-8).

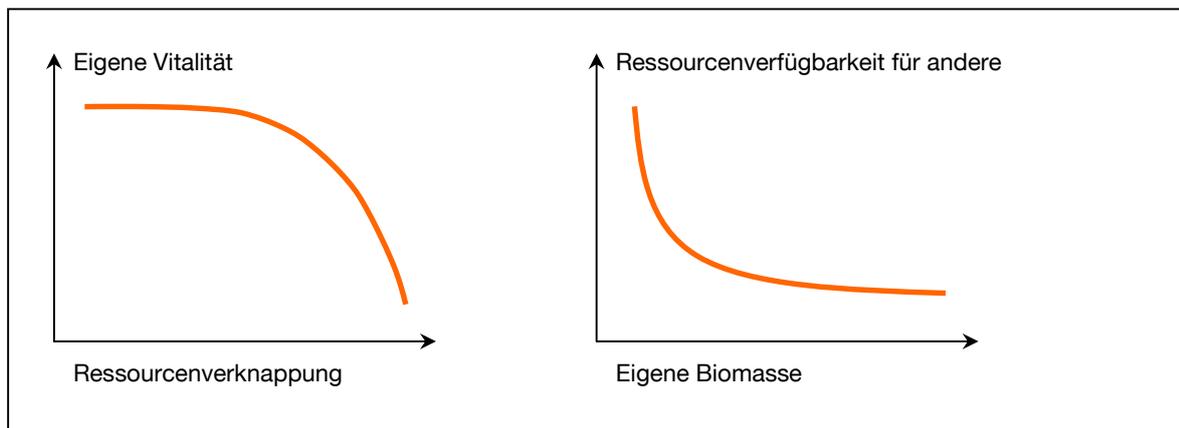


Abb. 2-8: Folgen hoher Konkurrenzkraft einer Art bzw. eines Individuums (in Anlehnung an AMMER 2008). Bei überdurchschnittlicher Konkurrenzkraft verringert sich die eigene Vitalität erst bei starker Ressourcenverknappung im übergeordneten System (links), während der eigene Biomasseaufbau die Verfügbarkeit von Ressourcen für andere Organismen zeitig und stark einschränkt (rechts).

Für ein Individuum oder eine Art liegt ein Schlüssel zum Konkurrenzenerfolg deshalb in der Fähigkeit zur Raumbesetzung, das heißt zur vertikalen und horizontalen Ausdehnung. Die entscheidende Basis für diese Fähigkeit ist gerade bei dauerhaften Lebewesen wie Bäumen ihre bereits erreichte Größe. Zur Erfassung und modellhaften Nachbildung der Konkurrenz in Waldökosystemen und der individuellen Position im entsprechenden Gefüge werden deshalb häufig neben der räumlichen Position der Konkurrenten auch ihre Dimensionen erfasst. Dazu existiert eine Vielzahl von Ansätzen auf unterschiedlichen Skalenebenen (OTTO 1994; PENG 2000; PRETZSCH 2001) mit verschiedenen Abstufungen zur Vereinfachung der komplexen Realität. Geometrische Modelle zum Beispiel aus der Gruppe der "*size-relation indices*" (VANCLAY 1994) benutzen häufig nur oberirdisch messbare Größen. Auf Grund der allometrischen Beziehungen zwischen Kronen- und Wurzelraumgröße sowie der physiologischen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Baumkompartimenten erlauben sie aber auch Rückschlüsse auf die unterirdischen Verhältnisse. Hier ist eine Besonderheit zu beachten: Die Quantifizierung der Konkurrenzbeziehungen anhand der Größe der Individuen fußt auf der Annahme, dass die Einflüsse der Organismen aufeinander proportional zu den Größenverhältnissen zwischen ihnen sind ("symmetrische" Konkurrenz). Besonders in Untersuchungen zur Wurzelkonkurrenz sind jedoch auch Fälle "asymmetrischer" Konkurrenz beobachtet worden, in denen die Konkurrenzwirkungen

unabhängig von den messbaren Dimensionen waren (REWALD & LEUSCHNER 2009). Rückschlüsse auf Konkurrenzverhältnisse anhand von Größenunterschieden sollten deshalb erst nach Betrachtung des Einzelfalls gezogen werden.

Die Wirkungen der Konkurrenz auf einen Einzelbaum werden häufig in Indizes zusammengefasst, die sich nach der Art ihrer Berechnung verschiedenen Gruppen zuordnen lassen (BIGING & DOBBERTIN 1992; VANCLAY 1994; PENG 2000; SCHRÖDER 2004). Auf die einzelnen Hauptgruppen dieser Konkurrenzindizes (CIs) soll hier nicht näher eingegangen werden. Die in der Waldwachstumsmodellierung weit verbreiteten geometrischen CIs berechnen sich aus den Dimensionen des jeweils betrachteten Baumes ("Zentralbaum") und denen seiner als Konkurrenten wirksamen Nachbarn. Sind die räumlichen Wuchskonstellationen, die über den Konkurrenzeinfluss entscheiden, im betrachteten Bestand bei geringer Varianz gleichmäßig verteilt, so kann die Position des Einzelbaums vernachlässigt werden. Die so gebildeten positionsunabhängigen CIs erlauben verlässliche Rückschlüsse zum Beispiel auf die Konkurrenzverhältnisse in einschichtigen, horizontal homogen strukturierten Beständen aus wenigen Baumarten (KRAJICEK et al. 1961; WYKOFF 1990). In Mischbeständen mit stärker differenzierten Wuchskonstellationen und/oder variablen Altersverhältnissen sind genauere Aussagen zur Konkurrenz zwischen den Individuen eher bei Verwendung positions- bzw. distanzabhängiger Indizes zu erwarten (BIGING & DOBBERTIN 1992; PRETZSCH 1995; MÜNDELER 2005). Als "eingeschränkt positionsabhängige CIs" werden Mischformen bezeichnet, bei denen ein Bezugsgebiet geringer Größe über die betrachtete Fläche "wandert", entweder systematisch oder mit dem Stammfußpunkt des jeweiligen Zentralbaums als Zentrum (STAGE & LEDERMANN 2008). Die Koordinaten eines Baumes sind dann nur wichtig für die Bestimmung der Zugehörigkeit zum Bezugsgebiet, innerhalb dessen es dann aber unerheblich ist, wo genau sich die einzelnen Konkurrenten befinden.

– Konkurrenzwirkungen auf den Zuwachs –

Im Allgemeinen besteht eine positive Korrelation zwischen dem über die Konkurrenzstärke bestimmten Ressourcenzugang und den Zuwachsleistungen von Organismen in Ökosystemen (OTTO 1994). Je größer die Bedeutung eines bestimmten Faktors (Licht, Wasser, bestimmte Nährstoffe etc.) für das Wachstum und je stärker diese Ressource "umkämpft" ist, desto deutlicher lässt sich der Zusammenhang zwischen dem Status im Konkurrenzgefüge und den Wuchsleistungen durch geeignete Messverfahren und statistische Aufbereitung nachweisen.

Die positive Korrelation zwischen Konkurrenzstärke und Zuwachs (vgl. Abb. 2-8) ist hauptsächlich dort zu beobachten, wo das "Netto"-Angebot noch nicht dem Optimum entspricht, das physiologisch umgesetzt werden könnte (LYR et al. 1992). Bei Individuen in Sonderstellung wie bei Solitärbäumen oder Überhältern ist davon auszugehen, dass Zuwachsschwankungen so gut wie ausschließlich aus der Variation des Gesamt-

Ressourcenangebots folgen¹. Analog dazu haben ausgeprägt konkurrenzschwache Organismen oft extrem niedrige Wachstumsraten in kaum noch signifikanter Abhängigkeit von ihrer tatsächlichen Konkurrenzsituation (Theorie der "relativen Dominanz", D'AMATO & PUETTMANN 2004). In den "Randbereichen" von Pflanzengesellschaften mit sozialen Abstufungen wie zum Beispiel in Waldbeständen ist demnach der Zusammenhang zwischen Zuwachs und Konkurrenz statistisch schwächer zu belegen. Die schärfste und am besten zu beobachtende Konkurrenz spielt sich vielmehr im mittleren Bereich ab, in dem quasi über den sozialen Auf- oder Abstieg entschieden wird.

Die Zusammenhänge zwischen Wachstum und Konkurrenzeinflüssen lassen sich darüber hinaus am deutlichsten in den Phasen der individuellen Entwicklung nachweisen, in denen das Wachstum zumindest potentiell am größten ist. Bäume mit geringer Wachstumsplastizität wie die Kiefer zeichnen sich durch ein hohes Reaktionsvermögen in der Jugend aus, das mit dem Alter aber schnell nachlässt. Die Dickungs- und frühe Stangenholzphase ist für solche Baumarten entscheidend, was die forstliche Steuerung des Wachstums angeht: Der BHD-Zuwachs einzelner Bäume steigt nach Vergrößern ihres Wuchsraumes umso stärker, je eher diese Maßnahme ergriffen wird (STÄHR & HAINKE 2009). Das andere Extrem bilden Baumarten wie die Buche, die auf Grund ihrer Schattentoleranz und großen Kronenplastizität noch bis ins hohe Alter mit Zuwachssteigerungen auf eine verbesserte Konkurrenzkonstellatation reagieren können (BURSCHEL & HUSS 1997). Die Trauben-Eiche ordnet sich zwischen diesen beiden Polen ein. Nach den Angaben der Ertragstafeln von ERTELD (1963) kulminieren der Höhenzuwachs je nach Bonität zwar relativ früh, andererseits lassen sich in Trauben-Eichen-Beständen im Alter von über 100 Jahren Konkurrenzeinflüsse auf den individuellen Kreisflächenzuwachs nachweisen (SCHRÖDER 2009a). Auch die in der Literatur hervorgehobenen waldbaulichen Möglichkeiten, die Holzqualität der Eichen im Sinne eines gleichmäßigen Jahrringbaus zu beeinflussen, sprechen für einen langen Zeitraum, in dem die Bäume im Radialzuwachs auf Veränderungen der Konkurrenz reagieren können (KRAHL-URBAN 1959; SPIECKER 1991, 2007).

2.2.5 Beziehungen zwischen Wachstum und Vitalität: "*growth or defense*"

Bei Betrachtung der Zusammenhänge zwischen der Vitalität und dem Wuchsverhalten von Bäumen wird in der Regel von gleichgerichteter Variation ausgegangen: Im Vergleich zwischen Einzelbäumen oder Beständen bedeutet demnach eine relativ hohe Vitalität auch relativ große Zuwächse und umgekehrt. MANION (1981) beschreibt ein reduziertes Spross- und Durchmesserwachstum als erstes Symptom von Gesundheitsstörungen bei Bäumen. Auch nach den Definitionen im Abschnitt 2.2.1 impliziert der Begriff "Vitalität" in der Regel auch ein spezifisches Maß an "Wuchskraft", also an der Fähigkeit zur Größenzunahme

¹ Das Wachstum von Organismen, die ohne Konkurrenzeinflüsse auf das Ressourcenangebot zugreifen können, wird in "Potentialmodellen" als Referenz bzw. die obere Grenze der möglichen Wuchsleistungen benutzt. Die Entwicklung von Individuen unter Konkurrenz folgt in diesen Modellen demselben Muster, jedoch auf einem durch die Konkurrenz modifizierten, das heißt reduzierten Niveau (PRETZSCH 2001).

(ROLOFF & KLUGMANN 1997; KÄTZEL 2003). Letztere speist sich ebenso wie die Fähigkeit zur Gefahrenabwehr aus den Energievorräten, die der Baum durch Assimilation in Abhängigkeit von den verfügbaren Ressourcen anlegt. Auf Grund des begrenzten Umfangs der Nettoassimilation stehen der Zuwachs und die Bildung von Abwehrstoffen in einem komplementären Verhältnis, das sich in der These "*growth or defense*" (HERMS & MATTSON 1992; Abb. 2-9) zusammenfassen lässt. Als repräsentativ für Gesundheits- beziehungsweise Abwehrstatus wird nach diesem Modell das Maß des Sekundärstoffwechsels, das heißt die Menge und Qualität der von der Pflanze gebildeten Sekundärmetabolite. Die dafür notwendigen energetischen und stofflichen Ressourcen stehen dem Baum nicht für das Wachstum zur Verfügung (MANION 1981; KÄTZEL 2003). In der Phase der rapiden Zunahme (Phase I) der Netto-Assimilation steigen sowohl der relative Zuwachs als Quotient aus absoluter Größenzunahme und Ausgangsdimension als auch das Maß des Sekundärstoffwechsels. Mit weiter steigender Ressourcenverfügbarkeit und nur noch schwach zunehmender Netto-Assimilation (Phase II) wächst jedoch der Anteil der für den relativen Zuwachs aufgewandten Assimilate, während die für die Produktion sekundärer Pflanzenstoffe aufgewandte Energiemenge sinkt (BAZZAZ et al. 1987)¹.

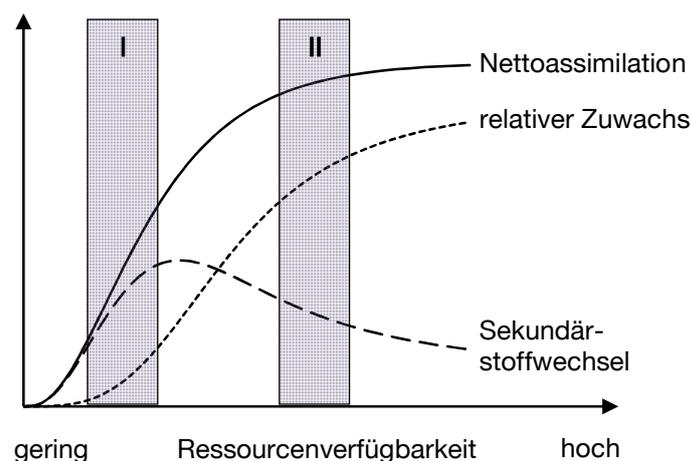


Abb. 2-9: Beziehungen zwischen Nettoassimilation, relativem Volumenzuwachs und Sekundärstoffwechsel nach HERMS & MATTSON (1992). Letzterer kann auch (als Differenz zwischen Nettoassimilation und Zuwachs) verstanden werden als die Menge an Ressourcen, die zur Bildung sekundärer Pflanzenstoffe zur Verfügung steht.

Das tatsächliche Verhältnis zwischen Zuwachsvermögen und Sekundärstoffwechsel, das sich an einer bestimmten Pflanze beobachten lässt, ist genetisch fixiert und variiert nach HERMS & MATTSON (1992) *individuell* nur in engen Grenzen. Entscheidend für die Anpassungsfähigkeit an eine veränderliche Umwelt ist die genetische Variabilität, die eine Population oder *Art* in diesem Merkmal aufweist. Am erfolgreichsten sind die Individuen, die gerade noch so viel "Abwehraufwand" betreiben, dass ein Maximum an Zuwachs möglich ist, welches zu Vorteilen im Konkurrenzkampf führt, die aber auch nicht so stark wachsen, dass

¹ "Zunehmen" und "Sinken" sind hier nur eingeschränkt als dynamische Prozesse zu verstehen, die in einem Organismus je nach Ressourcenverfügbarkeit ablaufen. Die Abb. 2-9 ist auch als Schema zu sehen, in das sich Individuen je nach den für sie verfügbaren Ressourcen einordnen lassen – verschiedene Punkte auf den dargestellten Kurven sind nicht nur als unterschiedliche Zustände eines Organismus zu sehen, sondern auch als unterschiedliche Organismen in individuell verschiedenem Zustand.

nur noch zu wenige der überlebensnotwendigen Sekundärmetabolite gebildet werden können. Die natürliche Auslese wird diejenigen Individuen benachteiligen, deren Verhältnis zwischen Wachstum und Abwehr in die eine oder die andere Richtung unausgewogen ist.

Unterstellt man die grundsätzliche Gültigkeit eines *trade-off* zwischen Zuwachs und Abwehrvermögen in einer Population im Sinne von "*growth or defense*", dann müssten sich je nach Ressourcenverfügbarkeit und genetischer Disposition (siehe oben) mit steigendem relativen Zuwachs entweder gleichgerichtete oder gegenläufige Unterschiede in der Vitalität in engerem Sinne¹ beobachten lassen. Die nicht nur im Bereich der Waldzustandseinschätzung weit verbreitete Annahme, dass höhere Vitalität mit größerem Zuwachs verbunden ist (DOBBERTIN 2005; DROBYSHEV et al. 2007), wäre dann nur im Bereich der Phase I gültig, während weiter steigender Zuwachs mit zunehmenden Vitalitätsproblemen gekoppelt sein müsste (Phase II). Wichtige Voraussetzungen für die Nachweisbarkeit einer direkten Beziehung bestehen darin, dass

- a) sich ein verringerter Umfang des Sekundärstoffwechsels auch in mehr oder weniger proportional abnehmender Vitalität äußert, und dass es
- b) zuverlässige Methoden zur korrekten Einschätzung dieser zum Sekundärstoffwechsel annähernd parallelen Vitalität gibt.

Untersuchungen zum Thema *growth or defense* haben zu berücksichtigen, dass in der Praxis verschiedene Methoden zur Vitalitätseinstufung für Waldbäume angewandt werden, die sich in der Regel auf vergleichende Beobachtungen des Kronenzustands beschränken (ROLOFF 1993; KÖRVER et al. 1999; EICHORN et al. 2006). Außerdem ist zu erwarten, dass sich die unter kontrollierten Bedingungen feststellbaren Abhängigkeiten nach Abb. 2-9 in Waldökosystemen nicht mit vergleichbarer Deutlichkeit zeigen. Gerade für die heimischen Eichen bestehen wegen der häufigen Schäden durch blattfressende Insekten, aktive Abstoßung von Zweigen in Belastungsphasen (Abscession) sowie die hochvariable Kronengestalt nur sehr lückenhafte Erkenntnisse über die tatsächlichen Zusammenhänge zwischen Kronenzustand und Wuchsleistung (KLUGMANN & ROLOFF 1999; THOMAS et al. 2002; KALLWEIT 2006).

Neben den auch für Eichen nachgewiesenen positiven Korrelationen zwischen den Werten von Vitalitätsansprachen und dem Zuwachs (DROBYSHEV et al. 2007) gibt es vielfältige Belege dafür, dass höhere Wachstumsraten, das heißt schnelleres Wachstum, langfristig zu früherem Altern und Sterben führen als niedrigere Wachstumsraten (KAHLE et al. 2011). PEÑUELAS (2005) weist zum Beispiel auf die Tatsache hin, dass die ältesten Bäume der Erde, die Grannenkiefern (*Pinus longaeva* D. K. BAILEY) in den kalifornischen White Mountains, auf trockenen Standorten mit extremen Temperaturschwankungen bei minimalen Jahrringbreiten wachsen. Im europäischen Kontext wiederum haben Untersuchungen in Katalonien gezeigt, dass Kiefern mit größeren Jahrringbreiten empfindlicher auf Dürreereignisse reagieren als geringwüchsige Bäume (MARTÍNEZ-VILALTA et al. 2012). Einen eher gegen-

¹ Im Gegensatz zur Vitalität in "weiterem Sinne" ist hier das reine Abwehrvermögen eines Organismus beziehungsweise die Fähigkeit gemeint, seine wesentlichen Lebensfunktionen aufrechtzuerhalten.

läufigen Zusammenhang zwischen Zuwachs und Kronenzustand konstatierten auch UTSCHIG et al. (2006), die für Eichenversuchsflächen in Bayern einen deutlich gesteigerten Volumenzuwachs nachwies, obwohl die Eiche in Bayern verbreitet unbefriedigende Vitalitätswerte aufwies (PRETZSCH 1996). STERBA (1996) beschreibt in Teilen Europas steigende Wachstumstrends nicht nur in Fichtenbeständen bei zunehmender Kronenverlichtung entsprechend den Waldzustandserhebungen und weist auf das "Referenzbaumproblem" bei Vitalitätseinschätzungen hin (siehe 2.2.1). Im SCHWAPPACH'schen Provenienzversuch zur Baumart Kiefer weist die Herkunft "Auvergne" (Südfrankreich) die mit Abstand schlechtesten Wuchsleistungen auf, zeichnete sich im Extremsommer 2003 jedoch durch die höchsten Konzentrationen von Substanzen zur physiologischen Bewältigung von Trockenstress in den Nadeln aus (KÄTZEL & LÖFFLER 2007; SCHRÖDER & PANKA 2009). Ergebnisse wie dieses belegen, dass bei Bäumen auch die Phase II des Schemas von HERMS & MATTSON (1992) beobachtet werden kann, in der entweder die Abwehr schädlicher äußerer Einflüsse Energie und Kohlenwasserstoffe "kostet" (KÄTZEL 2003) – und zu geringerem Wachstum führt – oder hohe Wuchsleistungen mit zumindest visuell eingeschränkter Vitalität verbunden sind.

Unabhängig von biochemischen Belegen lassen sich auch aus der Stress-Theorie die zum Teil beobachteten erhöhten Wuchsleistungen bei steigender Belastung durch Umweltfaktoren erklären (TESCHE 1991, siehe Abb. 2-5). Zum einen besteht die Möglichkeit, dass über Eustress die Anpassung oder Abhärtung des Organismus erfolgreich verläuft. Zum anderen könnte das von uns gemessene Merkmal, zum Beispiel der BHD oder die Kronentransparenz, nicht der Parameter sein, in dem sich Stressreaktionen durch Reduktion äußern, sondern der, mit dessen Hilfe die Pflanze versucht, wirklich entscheidende Vitalitätsverluste, die man an anderen Orten messen müsste, durch Steigerung zu kompensieren. Drittens kommen Phasenverschiebungen zwischen Stress und den entsprechenden physiologischen oder wachstumskundlich feststellbaren Reaktionen als Ursache für vordergründig widersprüchliche Untersuchungsergebnisse in Betracht. Mit Bezug auf das Einzelbaumwachstum wäre zum Beispiel denkbar, dass Eichen auf Kronenschäden mit Veränderungen ihrer "Formigkeit", das heißt mit einer Verlagerung der Holzbildung "nach unten" reagieren: Bei steigendem BHD-Zuwachs kann dabei der Stammvolumenzuwachs insgesamt sinken. Umgekehrt kann ein Assimilatestau infolge gestörten Wassertransports zwischen Xylem und Phloem zu verstärktem Zuwachs im oberen Teil des Baumes führen, während im Wurzelbereich und unteren Stammabschnitten der Zuwachs zurückgeht (HARTMANN 2011)¹.

¹ RÖHLE (1987) hat zum Beispiel an Fichten im Bayerischen Wald, die eine deutliche Kronenauflichtung aufwiesen, eine Verlagerung des Volumenzuwachses in den Kronenbereich festgestellt, während auf Brusthöhe der Radialzuwachs kaum messbar war. Ähnliches belegt PRETZSCH (2008) in seiner Auswertung eines Begasungsversuches in Bayern: Fichten und Buchen, die im Vergleich zum Normalniveau verdoppelten Ozonkonzentrationen ausgesetzt waren, reduzierten ihren Durchmesserzuwachs, was bei etwa gleichbleibendem Höhenzuwachs zu Verschlankeung und "Kopflastigkeit" führte.

2.2.6 Wachstumssteigernde vs. wachstumshemmende Umwelteinflüsse

Die Abhängigkeit der Waldbäume von externen Einflüssen hat neben den bisher hauptsächlich diskutierten Belastungen oder Risiken natürlich auch zur Folge, dass bei günstigen Faktorenkonstellationen und gerichteten Veränderungen hin zu förderlichen Wuchsbedingungen Wachstum und Vitalität zunehmen können. Weiter oben wurde bereits angedeutet, dass parallel zur Waldschadensdiskussion in den 1980er und 1990er Jahren in vielen Teilen Europas steigende Wachstumstrends¹ beobachtet wurden (RÖHLE 1996; STERBA 1996, KARJALAINEN et al. 1999). Sie wurden hauptsächlich anhand steigender Baum- und Bestandeshöhen bei definiertem Alter, aber auch als zunehmende Volumen- oder Nettoprimärproduktion quantifiziert. Gesteigertes Wachstum war vor allem im südlichen Nordeuropa, in vielen Teilen West- und Mitteleuropas sowie etwas weniger einheitlich in Südeuropa festzustellen (SPIECKER 1999). Die umfangreichsten Untersuchungen zum Thema sich ändernder Wachstumstrends fanden an den Haupt-Wirtschaftsbaumarten Fichte, Kiefer und Buche statt (SPIECKER et al. 1996; RÖHLE 1997; REHFUESS et al. 1999; KARJALAINEN et al. 1999). Im Mittelpunkt stand die Frage, welche Ursachen für die höheren Wuchsleistungen verantwortlich sind. Nach SPIECKER (1999) sind dabei folgende Einflussgruppen zu unterscheiden:

- (a) Landnutzungsgeschichte und forstliche Verfahren;
- (b) Klima und natürliche Störungen;
- (c) Veränderungen in den atmosphärischen Konzentrationen von CO₂, O₃, SO₂ und in den Stickstoff-Immissionen².

Methodisch wird in den meisten Studien der Einfluss geänderter Bewirtschaftungsverfahren von Veränderungen der Standortproduktivität getrennt (obwohl es auch hier Rückkopplungsketten gibt, zum Beispiel in Form langfristiger Oberbodenaufwertung nach Ende der Streunutzung, NOACK 2012). Zu den landnutzungsbezogenen und technologischen Faktoren der Gruppe (a), die an den steigenden Wuchsleistungen auf verschiedenen zeitlichen und räumlichen Ebenen beteiligt sind, gehören die langfristigen Effekte ordnungsgemäßer Forstwirtschaft wie die Verwendung geprüften Vermehrungsgutes und die über mehrere Generationen wirksame Auslese "mit der Axt"³. Hinzu kommen eine Reihe von standortverbessernden Maßnahmen wie Kalkung und Düngung, die zum Beispiel in Brandenburg in den 1960er und 70er Jahren zur Aufwertung nährstoffarmer Böden und zum Ausgleich von überhöhten SO₂-Belastungen stattfanden. Auf einer sehr allgemeinen Ebene haben außerdem die Kriegsschäden (nicht nur in Deutschland) und für Reparationsleistun-

¹ Nach SPIECKER (1999) sind diese Wachstumstrends als "*long-term site-induced deviations from former growth rates*" definiert, also als standortsbedingte langfristige Abweichungen von früheren Wachstumsraten.

² Die Kohlendioxid-Konzentrationen nehmen innerhalb dieser Einflussfaktoren eine Sonderstellung ein, da sie zum einen über den Treibhaus-Effekt klimawirksam werden können, zum anderen den notwendigen "Rohstoff" für die Photosynthese bereitstellen.

³ Weiter oben ist bereits die teils jahrhundertealte Streunutzung genannt worden, die gegen Mitte des vergangenen Jahrhunderts zum Erliegen kam. Das führte zu einer Erholung und Humusanreicherung der Standorte und letztlich zu gesteigertem Wachstum (NOACK 2012).

gen durchgeführte Einschläge dazu geführt, dass vermehrt jüngere Bestände aufgeforstet wurden, die in den letzten Jahrzehnten ihre produktivste Wuchsphase durchliefen. Ein Beispiel für eher kleinräumige Einflüsse geänderter Bewirtschaftung sind stärkere Durchforschungen als früher üblich. Sie können bei entsprechender Standortproduktivität sowohl auf Einzelbaum- als auch auf Bestandesebene höhere Zuwachsleistungen bewirken (SPIECKER 1991; UTSCHIG et al. 2006; NAGEL 2007; BERGÈS et al. 2000)¹.

Aus den vielfältigen Untersuchungen über die Beziehungen zwischen dem Wuchsverhalten und den Einflussgruppen (b) und (c) sind die Erkenntnisse folgenden regional und baumartspezifisch besonders beispielhaft:

- Das "RECOGNITION"-Projekt (REHFUESS et al. 1999) beschäftigte sich europaweit mit den Wirkungen veränderter Nährstoffverfügbarkeit auf das Baum- und Bestandeswachstum von Fichte, Kiefer und Buche. Die beobachteten höheren Wuchsleistungen werden als kombinierter Effekt gesteigerter Stickstoff-Immissionen und CO₂-Konzentrationen gewertet. Geänderte Bewirtschaftungsverfahren sind ebenfalls beteiligt, während die gestiegenen Temperaturen nur einen geringen Einfluss ausüben.
- HASENAUER et al. (1999) untersuchen mit Hilfe des biogeochemischen Prozessmodells "FOREST-BGC" am Beispiel der Fichte mögliche Ursachen für die gestiegenen Volumenzuwächse in Österreich. Unter den vermuteten Ursachen – Steigerung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre, zunehmende Stickstoff-Immissionen², klimatischer Wandel – halten sie letztere wegen der signifikanten Erhöhung der Wintertemperaturen und einer verlängerten Vegetationsperiode für die Hauptursache der Wuchssteigerungen.
- Für Buchenbestände in Mitteldeutschland haben BASCIETTO et al. (2004) ein um gut sechs Prozent stärkeres Wachstum jüngerer Buchenbestände im Vergleich zu älteren auf gleichem Standort nachgewiesen. Sie führen dies auf die verbesserten Wuchsbedingungen vor allem wegen Standorts- und Witterungsveränderungen zurück.
- Die bereits zitierte Studie von UTSCHIG et al. (2006) belegt für bayerische Versuchsflächen seit 1981 im Mittel eine standortsinduzierte Wuchssteigerung von 13 %, hergeleitet aus dem Quotienten des Volumens der Grundflächenmittelstämme mäßig durchforsteter Parzellen zum Ertragstafelwert. Werden Bewirtschaftungseffekte eingerechnet, dann lag die Wuchssteigerung im Mittel sogar bei etwa 25 %.
- PÉREZ et al. (2005) haben das Wachstum der Kiefer auf Level-II-Dauerbeobachtungsflächen in Brandenburg analysiert und dabei eher uneinheitliche Wachstumstrends festgestellt. Bestände mit zurückgehendem Wachstum und Vitalitätsproblemen zeigen eine überhöhte Versorgung mit Stickstoff und zum Teil mit Phosphor.

¹ "*Changes in silvicultural practices in managed forests, with stronger and more frequent thinnings in the young forest stands, could also be responsible for a higher radial growth of the dominant trees*" (Bergès et al. 2000).

² Die häufig als wichtige Ursache von Zuwachssteigerungen genannten erhöhten Stickstoff-Einträge haben in Brandenburg seit einiger Zeit auch direkt nachteilige Folgen für Wachstum und Vitalität. HEINSDORF (1993) beschreibt die negativen Wirkungen der massiven Immissionen auf das Wurzelsystem, die Konkurrenz durch Bodenvegetation und schließlich auf die Wuchsleistungen in Kiefernbeständen.

- Ebenfalls anhand dauerhafter Versuchsflächen untersuchten DHOTE & HERVÉ (2001) langfristige Veränderungen des Wachstums von Trauben-Eichen in Frankreich. Sie nutzten dazu dendrochronologische Methoden und fanden – gemessen an der Entwicklung des Grundflächenzuwachses über der Zeit – verbreitete Zunahmen der Produktivität seit spätestens 1960. BADEAU et al. (1996) bestätigen für die letzten Jahrzehnte des zwanzigsten Jahrhunderts die ansteigenden Wachstumstrends für Eiche in Frankreich.

Für die Bezugsregion selbst sind nur wenige Untersuchungen bekannt, die sich speziell mit Wachstumstrends der Eichenarten in der jüngeren Vergangenheit beschäftigen. In Nordwestdeutschland hat sich zum Beispiel NAGEL (2007) mit der Entwicklung ertragskundlicher Kenngrößen auf jüngeren Eichen-Versuchsflächen beschäftigt. Dabei zeigten sich Zuwachseleistungen, die häufig auch bei starker Durchforstung deutlich über der ersten Ertragsklasse der Tafel nach ERTELD (1963) lagen. Für Nordostdeutschland wurden vorrangig Veränderungen im Wuchsverhalten der Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) untersucht (zum Beispiel von PÉREZ et al. 2005; BECK 2007 und NOACK 2012) sowie allgemein die Wirkung der Witterung auf den Zuwachs (BECK 2004; SCHRÖDER & BECK 2009). Mit dem regionalen Wachstum der Eiche beschäftigen sich eine Fülle von Publikationen (zum Beispiel KRAHL-URBAN 1939; ERTELD 1962; MUCHIN 2002; LOCKOW 2006a). Den Zusammenhang zwischen dem Wuchsverhalten der Trauben-Eiche und den seit Jahrzehnten zu beobachtenden Klima- und Standortveränderungen hat NOACK (2011) für die Bedingungen im Land Brandenburg analysiert. Er stellt auf Basis langfristiger waldwachstumskundlicher Versuchsflächen seit den 1970er Jahren verbesserte Bonitäten fest und führt die gestiegenen Wuchseleistungen auf die zunehmende CO₂-Konzentration, erhöhte Stickstoff-Immissionen und steigende Temperaturen zurück.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es in den letzten Jahrzehnten europaweit ansteigende Zuwachstrends gegeben hat. Wichtig für das Verständnis dieses Phänomens ist zum einen, dass die Ursachengefüge jeweils spezifisch und nur eingeschränkt übertragbar sind: "... *for different sites changes in different factor constellations may have caused the temporal changes of growth patterns*" (REHFUESS et al. 1999). Zum anderen kann es regional und lokal durchaus auch Abweichungen nach unten, das heißt fallende Zuwachstrends, geben. Projektionen dazu, ob die Bestände den allgemein steigenden Trend bei weiter fortschreitendem Klimawandel fortsetzen können, sind deshalb auch vor dem Hintergrund dieser beiden Einschränkungen zu sehen. Je nach Bezugsregion kann die Reaktion einer Baumart zum Beispiel auf steigende Temperaturen unterschiedlich ausfallen (LINDNER et al. 2005; ERIKSSON et al. 2012). Über die Wachstumstrends ganzer Wälder oder gar Regionen entscheidet letztlich die Kombination aller drei oben genannten Einflussgruppen zusammen mit der lokalen Witterungsausprägung und den spezifischen Standortbedingungen.

2.2.7 Das Konzept der "Vulnerabilität"

Mit dem Begriff der "Vulnerabilität" wird allgemein die Anfälligkeit oder Verletzlichkeit von Elementen eines größeren Systems beschrieben (TURNER et al. 2003). Vor allem sozialwissenschaftliche Studien wenden ihn an, um zum Beispiel das Risiko für gesellschaftliche Gruppen einzuschätzen, durch Katastrophen zu verarmen oder die Fähigkeit zur Selbstversorgung zu verlieren (ADGER 2006). Vulnerabilität wird als Kategorie zunehmend auch bei der Analyse natürlicher Systeme genutzt, dabei kann es sich um einzelne Arten, Ökosysteme oder Landschaftselemente handeln. DELANGE et al. (2006) haben mit Hilfe dieses Begriffs zum Beispiel klassifiziert, wie empfindlich einzelne Wildtier-Schlüsselarten auf Schadstoffbelastungen ihrer Habitate reagieren. Für Wälder beziehungsweise forstliche Systeme hat sich das zugrundeliegende Konzept vor allem bei Untersuchungen zu ihrer möglichen Entwicklung im Klimawandel etabliert (SMITH et al. 2001; FÜSSEL & KLEIN 2006; PARRY et al. 2007; DELANGE et al. 2010; LINDNER et al. 2010). Charakteristisch ist hier die verbindende Betrachtung zwischen sozialen und ökologischen Problemen.

Unabhängig von der Bezugsebene wird Vulnerabilität grundsätzlich als Funktion der Komponenten *Exposition* (beziehungsweise *Expositionsänderung*), *Sensitivität* und *Anpassungsvermögen* (zum Teil auch mit "Resilienz" bezeichnet) verstanden (PARRY et al. 2007). Der Begriff der Exposition fasst dabei alle gefährdenden Einflüsse (Risiken, Belastungen, Stressoren) zusammen, die Sensitivität kann auch mit Empfindlichkeit im engeren Sinne bezeichnet werden. Einfachere Konzepte auf niedrigerer Bezugsebene wie das "*risk-hazard*"-Schema oder die "*pressure-and-release*"-Modelle¹ bestehen im Wesentlichen aus diesen drei Komponenten (ADGER 2006). Exposition und Sensitivität können im Begriff des "Impakt" kombiniert werden, um die Wirkung externer Einflüsse konkreter zu fassen (PARRY et al. 2007). In der Weiterentwicklung wird dieser "Kern" der Analysen dann eingebettet in höhere Skalenebenen, deren Parameter in Zustand und Entwicklung die Kernkomponenten beeinflussen; so beziehen TURNER et al. (2003) Vulnerabilität immer auf einen bestimmten Ort und eine begrenzte Zeit ("*place*"), das untersuchte System ist jedoch über "*cross-scale*"-Beziehungen mit der umgebenden "Region" und diese wiederum mit globalen Prozessen und Einflüssen verbunden (Abb. 2-10). Der Prozesscharakter des Untersuchungsrahmens wird weiter betont dadurch, dass vor allem die störungsinduzierten Veränderungen in der Exposition für eine steigende oder sinkende Vulnerabilität ausschlaggebend sind. Über längere Zeit stabile Belastungen führen dagegen zur Anpassung und zum "Sich-Einstellen" der betroffenen Systemelemente (FÜSSEL & KLEIN 2006).

¹ Während der "*risk-hazard*"-Ansatz primär die Anfälligkeit von Teilen der menschlichen Gesellschaft gegenüber natürlichen Gefahren wie Stürmen, Überschwemmungen oder Seuchen untersucht, hebt das "*pressure-and-release*"-Schema vor allem die Bedeutung der politischen Ökonomie, das heißt des gesellschaftlich vermittelten Zugangs zu Ressourcen, für die Vulnerabilität bestimmter Bevölkerungsgruppen hervor (ADGER 2006).

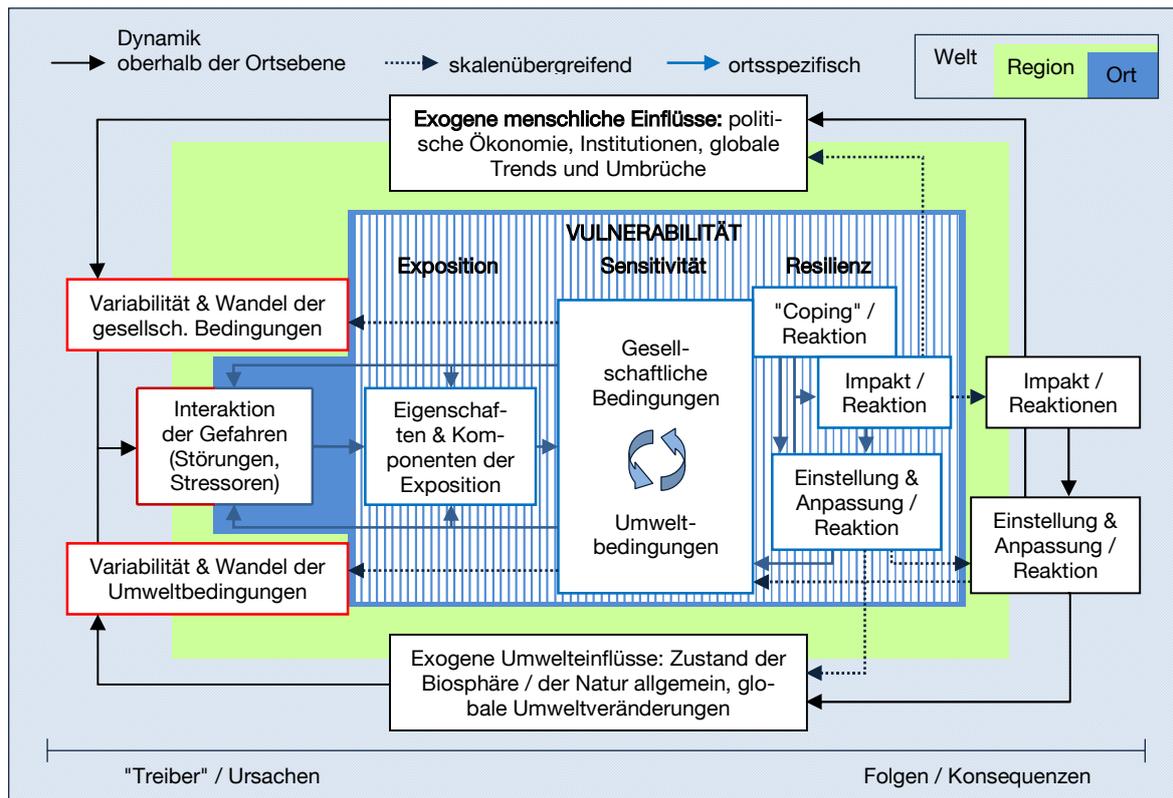


Abb. 2-10: Bezugssystem von Vulnerabilitätsanalysen (leicht verändert nach TURNER et al. 2003). Mit "Coping" wird das "Zurechtkommen" bezeichnet, das auf einem Sich-Einstellen an erst einmal unveränderbare Einflüsse aufbaut und vor allem in den sozialen Komponenten des betrachteten Systems wirkt.

Je nach betrachtetem System lassen sich verschiedene Teil-Vulnerabilitäten ableiten wie zum Beispiel die ökologische (DELANGE et al. 2010) oder die soziale Vulnerabilität als Voraussetzungen für umfassende Risikoanalysen ökonomisch-sozialer Systeme (ADGER et al. 2005). Nach dem Schema von TURNER et al. (2003; Abb. 2-10) sollten diese Elemente kombiniert werden, um Aussagen treffen zu können, die die Abhängigkeiten zwischen natürlichen und gesellschaftlichen Prozessen berücksichtigen. Die Vorteile von Vulnerabilitätsanalysen mit Blick auf den Klimawandel liegen dann darin, dass sie anthropogene Einflüsse beziehungsweise wirtschaftliche und soziale Effekte ebenso einbeziehen wie die ökologischen oder biochemisch-physikalischen Abhängigkeiten. Sie können so – aufbauend auf eher ökologisch-biologisch basierten Modellen zum Anpassungsvermögen und zum Verhalten bei physiologischem Stress – ein vollständigeres Bild zu den Chancen und Risiken nicht nur einzelner Arten, sondern ganzer Ökosysteme liefern (ADGER et al. 2005).

Eine große Herausforderung bei der Weiterentwicklung von Vulnerabilitätsanalysen liegt darin, ihre hauptsächlich qualitativen Aussagen stärker durch quantitative Ergebnisse zu ergänzen, die auf plausiblen Messverfahren beruhen. Auf relativ niedriger Hierarchieebene kann dies zum Beispiel durch die Anwendung eines Systems von Kriterien und Indikatoren erreicht werden, wie es ELLNER (2010) für die klimawandelbezogene Vulnerabilität von Baumarten in Nordostbrandenburg entwickelt hat. Für komplexere Fragen gerade in der

Verbindung zwischen Ökologie und gesellschaftlichen Faktoren besteht dabei jedoch noch größerer Forschungsbedarf, unter anderem weil in den verschiedenen Disziplinen bisher jeweils unterschiedliche Auffassungen und Ableitungsschemata für Vulnerabilität vorherrschen (ADGER 2006). Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit decken nur einen kleinen Teil des konzeptionellen Rahmens nach Abb. 2-10 ab, sie konzentrieren sich darauf, die Reaktionen im Wachstum einer gesellschaftlich relevanten Baumart quantitativ zu bestimmen und die Implikationen für ihre Berücksichtigung bei der Planung künftiger Nutzungssysteme für die Wälder in Nordostdeutschland qualitativ abzuschätzen (siehe 2.5, Seite 57).

2.3 Dendroökologische Analysen der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen

2.3.1 Gegenstand der Dendroökologie

Für viele praxisorientierte Fragestellungen in der Forstwissenschaft gilt die Entwicklung des Brusthöhendurchmessers (BHD) der Bäume, der zeitlebens durch die Neubildung von Xylem- und Phloemzellen zunimmt, als wichtigster Wachstumsindikator (WENK et al. 1990; BRAUN 1982). Neben seiner grundsätzlichen Bedeutung für die Stofftransportprozesse, die physikalische Stabilität und die Konkurrenzkraft ist für die Konzentration auf den BHD auch bedeutsam, dass er sich relativ genau mit einfachen Instrumenten wiederholt messen lässt, ohne den Baum zu beschädigen. Außerdem bildet der Stamm eines Baumes so etwas wie ein Archiv seiner historischen Entwicklung, das die Wachstumsprozesse zurückliegender Jahre in ihrem Verlauf und ihrer Summe speichert und retrospektiven Analysen zum Beispiel durch die Auswertung von Bohrkernen oder Stammscheiben zugänglich macht (SCHWEINGRUBER 1983).

In Mitteleuropa sind Wachstumsvorgänge durch eine jahreszeitliche Rhythmik mit kältebedingter Ruhepause geprägt, die die Unterscheidung der einzelnen Wuchsjahre und die Zuordnung der entsprechenden Wachstumsraten ermöglicht. Analysen des jährlichen Zuwachses in Form der Jahrringbreite und seiner Beziehungen zu den Wuchsbedingungen bilden aus diesen Gründen auch einen Schwerpunkt der *Dendrochronologie* (FRITTS 1976; COOK & KAIRIUKSTIS 1990; BONN 1998; NEUMANN 2001; BECK 2007, SPEER 2010). Dieser auch als "Jahrringforschung" bezeichnete Wissenschaftsbereich verwendet nach BÜNTGEN et al. (2008) definierte Jahrringe oder ihre Abfolge vorrangig zur Datierung, zum Beispiel anhand historischer Holzproben. Die *Dendroklimatologie* nutzt die dendrochronologischen Erkenntnisse zur Modellierung der Zusammenhänge zwischen Witterung und Zuwachs, um Vorstellungen über die Umweltbedingungen in der Vergangenheit abzuleiten: Jahrringdaten bilden als "Proxyindikatoren" eine der wichtigsten Quellen zur Rekonstruktion historischer Klimaverhältnisse (ESPER et al. 2002; HUGHES 2011). Mit dem Begriff *Dendroökologie* wiederum sollen im Folgenden alle Forschungsarbeiten zusammengefasst werden, die die beiden erstgenannten Bereiche kombinieren und deren Erkenntnisinteresse

sich auf die Beziehungen zwischen Wachstumsprozessen verholzender Pflanzen und deren Umweltbedingungen richtet (SCHWEINGRUBER 1996; DITTMAR et al. 2003; FEKEDULEGN et al. 2003; BECK 2009; KOHLER et al. 2010).

Aktuelle Untersuchungen im beschriebenen Feld beziehen sich häufig auf die Definition durch FRITTS & SWETNAM (1989)¹, bereits 1963 nutzte jedoch schon VINŠ den Begriff "*dendroecology*", um die von ihm angestrebte wissenschaftliche Durchdringung waldökologischer Fragen mit den Kenntnissen zur Dendrochronologie und -klimatologie zu beschreiben (nach SERRE-BACHET & TESSIER 1990). Im Sinne von VINŠ (1963) sieht auch die vorliegende Arbeit das Potential der Dendroökologie nicht nur in der Wirkungsanalyse "anormaler" Umweltveränderungen wie Witterungsextreme oder Insektengradationen auf das Baumwachstum, sondern ganz allgemein in der Untersuchung der wuchsbeeinflussenden Faktoren von den Konkurrenzverhältnissen über schädigende Immissionen bis zur Wasserverfügbarkeit (VINŠ & POLLANSCHÜTZ 1977; GUILLEY et al. 2004). Dieses Spektrum kann natürlich nur in den seltensten Fällen komplett betrachtet werden, soll aber Horizont und Anspruch dendroökologischer Analysen verdeutlichen.

Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Wuchsverhältnissen und Jahrringbreiten ist schon vor über achtzig Jahren als Basis dendrochronologischer Untersuchungen zum Beispiel durch DOUGLASS beschrieben worden (SCHWEINGRUBER 1983). Seitdem haben sich sowohl die Instrumente als auch die methodischen Ansätze enorm vertieft und vervielfältigt. Neben der Jahrringbreite sind inzwischen auch die Holzinhaltsstoffe, ihre zeitliche Veränderung in Form unterschiedlicher Isotopenanteile sowie verschiedene Dichteparameter zu Gegenständen intensiver Untersuchungen geworden (SCHWEINGRUBER et al. 1987; HUGHES et al. 2011). Notwendige Bedingung aller jahrringbezogenen Forschungen ist die Datierung als möglichst zweifelsfreie Zuordnung der Wachstumsabschnitte zu Zeitabschnitten, in der Regel also der Jahrringe zu bestimmten Jahren (FRITTS 1976; COOK & PEDERSON 2011). Eines der wichtigsten Hilfsmittel dabei ist das *cross-dating*, bei dem bisher unbekannte Zuwachszeitreihen in sicher bestimmte Jahrringabfolgen so "eingehängt" werden, dass die Parallelität möglichst groß und die Abweichungen in Richtung und Maß der Zuwachsschwankungen möglichst gering sind (PILCHER 1990; siehe 2.3.3).

Informationen über Jahrringbreiten als notwendige Bedingung aller genannten Forschungsfelder können in unterschiedlichen Materialien enthalten sein. Dazu zählen

- durch "traditionelle" Zuwachsbohrer in verschiedenen Durchmesser entnommene Bohrkerne (vereinzelt auch als "Bohrspäne" bezeichnet; SPEER 2010),
- Stammscheiben oder Teile davon (Sektoren) (NEUMANN 2001; GÜNTHER 2013),
- mit Kanülen, Spezialhämmern ("Puncher") oder anderen geeigneten Werkzeugen gewonnene Mikroböhrkerne (BUES et al. 1999; WERF et al. 2007),
- Schnittpräparate (zum Beispiel in SCHILDBACH 2010) sowie

¹ "*The term dendroecology refers to applications of dendrochronological techniques to problems in ecology.*" (FRITTS & SWETNAM 1989)

- im weiteren Sinne auch Fotografien, Scans, computertomographische Aufnahmen und Röntgenbilder (SCHWEINGRUBER 1983).

Je nach Ausgangsmaterial, zur Verfügung stehenden Auswertungsgeräten und dem Stand des Wissens bei den Bearbeitenden lassen sich sehr unterschiedliche Daten extrahieren und analysieren. Die oberste, allgemeinste Ebene bilden die Jahrringbreiten, die weiter in Früh- und Spätholz getrennt untersucht werden können (ZHANG 1997; BERGÈS et al. 2008). Die einzelnen Wuchsbereiche (die nicht immer nur durch Winterkälte, sondern auch durch Trockenperioden, zum Beispiel in subtropischen Gebieten, abgegrenzt sein können) lassen sich rein okular (durch das menschliche Auge), aber auch durch automatisierte optische Verfahren sowie auf Basis von Holzdichteunterschieden quantifizieren (FRITTS 1976; ESPER et al. 2004). Eine weitere Analyseebene bilden intraannuelle Parameter der Holzanatomie und damit der Holzdichte, die vor allem mit Hilfe röntgendensitometrischer Methoden untersucht werden (SCHWEINGRUBER 1983; VIEIRA et al. 2010). Die feinste stoffliche Auflösung ist in dendrochemischen Untersuchungen – zum Beispiel zur Datierung von Vulkan- ausbrüchen – sowie Analysen der Gehalte an stabilen Isotopen von Kohlenstoff, Sauerstoff, und Wasserstoff im Holz (die so genannten "Dendro-Isotope", TREYDTE [2003]) erreicht (HILASVUORI & BERNINGER 2010, SPEER 2010). Beide Methoden konzentrieren sich in der Regel auf die Ableitung jährlich skaliertes Parameter¹.

Wie oben beschrieben richtet sich ein Hauptinteresse der Dendroökologie auf die in Jahrringen enthaltenen Informationen "nach außen", die Aufschlüsse über die herrschenden Wuchsbedingungen geben. Gerade zum Abschätzen des Verhaltens in der Zukunft ist jedoch auch wichtig, was die Jahrringe über den "inneren" Zustand der Bäume aussagen, das heißt über seine Fähigkeiten zur Ressourcennutzung und Raumbesetzung. Häufig wird deshalb der Zuwachs auch als Indikator für die "Wuchskraft" bzw. Vitalität eines Baumes oder Bestandes interpretiert und entsprechend ausgewertet (BECK 2004; vgl. 2.2.5). Besonders in Studien, die sich mit der Szenarienbildung für das Verhalten der Bäume unter Einfluss langfristiger klimatischer Änderungen beschäftigen, wird die Zuwachsentwicklung stellvertretend für die geschätzte Entwicklung der Vitalität betrachtet (UFNALSKI & SIEWECKI 2000, DROBYSHEV et al. 2007, FRIEDRICHS et al. 2009, SCHRÖDER & BECK 2009).

Für die Zwecke der Dendroökologie wird im Folgenden in Anlehnung an COOK (1990) die Jahrringbildung – in vereinfachender Annäherung – mit einem linearen Aggregationsmodell beschrieben. Danach setzt sich eine beobachtete Jahrringbreiten-Zeitreihe JRB_t additiv zusammen aus einer Reihe nicht direkt beobachteter "Sub-Zeitreihen" (Formel 2-1):

¹ Isotopen erlauben es, die Wuchsverhältnisse der Vergangenheit auch hinsichtlich der Herkunft der ins Holz eingelagerten Elemente zu rekonstruieren. So können zum Beispiel Strömungsverhältnisse in der Atmosphäre anhand der charakteristischen Isotopenzusammensetzung bestimmter Wassermassen abgeschätzt werden (MCCARROLL & LOADER 2004). Wegen kombinierter Effekte der atmosphärischen Feuchtigkeit auf die Baumphysiologie erwiesen sich außerdem die Isotopen-Messwerte für eine etwa 1200 Jahre umfassende Zuwachszeitreihe an verschiedenen Wacholderarten (*Juniperus spec.*) im Hochgebirge von Pakistan als besser geeignet zur Klimarekonstruktion als die Jahrringbreiten (TREYDTE 2003).

$$JRB_t = A_t + C_t + \delta \cdot SD_t + \delta \cdot SX_t + E_t$$

Formel 2-1

Mit	A_t	= Wert der Alterstrendfunktion der Jahrringbreite
	C_t	= klimatisch bedingtes Umweltsignal
	SD_t	= individueller endogener Störimpuls
	SX_t	= bestandesbezogener exogener Störimpuls
	E_t	= nicht erklärte interannuelle Variabilität (Zufallseffekt)
	δ	= binärer Indikator für Präsenz ($\delta = 1$) oder Absenz ($\delta = 0$) der Störimpulse

Grundsätzlich sind alle Sub-Zeitreihen von Interesse für dendroökologische Untersuchungen, vom langfristigen artspezifischen Zuwachsverhalten über dem Alter bis zum Ausmaß der Einheitlichkeit oder Varianz zwischen verschiedenen Bäumen eines Bestandes, das sich im Zufallsterm E_t widerspiegelt. Im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit steht jedoch meist das Klima- beziehungsweise Witterungssignal als ein Ausschnitt der veränderlichen Wuchsbedingungen, der ebenfalls durch Zeitreihen belegt werden kann. Unter "Signal" wird dabei mit COOK (1990) die aus Jahrringen abgeleitete Information verstanden, die relevant für die Untersuchung eines speziellen Problems ist (NEUMANN 2001). Im Gegensatz zum Signal ist das "Rauschen" der für das betreffende Problem irrelevante Teil der Jahrringinformationen. Abschnitt 2.3.3 geht näher auf den Stand der methodischen Möglichkeiten ein, die Beziehungen zwischen Jahrringbreite beziehungsweise Radialzuwachs und den Witterungsinformationen zu quantifizieren. Bei der Interpretation der gefundenen Beziehungen sind jedoch Einschränkungen zu beachten, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

2.3.2 Unsicherheit und Emergenz

Auf dem aktuellen methodischen und rechentechnischen Stand lassen sich sowohl die Jahrringbreiten korrekt zuordnen und präzise vermessen als auch umfangreiche Informationen über wuchsbeeinflussende Umweltfaktoren mit großer Genauigkeit erfassen. Grundsätzlich beschäftigt sich die Dendroökologie trotzdem mit statistischen Erscheinungen. Ihre Ergebnisse sind keine eindeutigen "Wahrheiten", sondern sie quantifizieren *Wahrscheinlichkeiten* – des Eintretens von Prognosen, des Wirkens von Beziehungen oder der Gültigkeit von Erklärungsmodellen. Bei der Erarbeitung und Interpretation jahrringbezogener Ergebnisse sind so auch verschiedene Niveaus von Unsicherheit zu berücksichtigen. Eine grundsätzliche Art von Unsicherheit resultiert zum einen daraus, dass man sich – meist retrospektiv – mit Wachstumsprozessen beschäftigt, die sich in einer natürlichen, durch ständigen Wandel gekennzeichneten und nicht völlig erfassbaren Umgebung vollzogen haben (MAYR 2000; COOK & PEDERSON 2011). Die für dendroökologische Studien in der Regel notwendige Konzentration auf Stichproben macht Auswahlprozesse nötig, in deren Ablauf weitere Zufallseinflüsse wirksam werden. Ihre Ergebnisse sind deshalb unter anderem abhängig

- auf Probenebene: von der Lage der Messlinie im Baum (Position auf der Stammscheibe beziehungsweise Ausrichtung der Bohrkerne),

- auf Ebene des Bestandes / der Population: von Art und Umfang der ausgewählten Stichprobe,
- auf Ebene der Baumart oder der Region: von den Eigenschaften der zur Beprobung ausgewählten Bestände,
- "quer" zu den Stichprobenniveaus: von der Methodik des Messens und der Datenweiterverarbeitung bis zur Ableitung mittlerer Verläufe.

Neben der Unsicherheit darüber, ob man wirklich alle relevanten Objekte und Prozesse erfassen kann, die die Jahrringbildung beeinflussen, ob man also "genug" weiß, gibt es eine zweite Art von Unsicherheit, die nach COOK & PEDERSON (2011) auf das Phänomen der "*emergence*" zurückzuführen ist. Dieser wissenschaftstheoretisch grundlegende Begriff bedeutet, dass die Ergebnisse des Zusammenwirkens komplexer Prozesse Eigenschaften aufweisen können, die man auch bei genauester Kenntnis der Einzelteile und -vorgänge nicht vorhersehen kann (MAYR 2000)¹. Emergente Eigenschaften sind demnach nicht vollständig zu erklären oder vorauszusagen, sondern können nur auf der Ebene der aus ihnen resultierenden Erscheinungen möglichst genau erkannt und beschrieben werden ("*So organisms must be explained as organisms, and not as a summation of genes*", GOULD 2003). In der Dendroökologie sind zum Beispiel die erstaunliche Linearität des Zusammenhangs zwischen relativ einfachen Witterungsparametern und den Jahrringbreiten sowie die Möglichkeit des *cross-dating* den emergenten Erscheinungen zuzurechnen. Beide Phänomene "überspringen" quasi hochkomplexe Systeme, deren rein mechanistisch-prozessorientierte Analyse ein wesentlich uneinheitlicheres Verhalten der Jahrringbreite als *response*-Größe erwarten ließe. Die von Emergenz ausgelöste Unsicherheit besteht demnach darin, dass jahrringbezogene Auswertungen immer auch zu neuen und unerwarteten Ergebnissen führen können, die auch bei Einsatz der bestgeeigneten Modelle und einem Höchstmaß an empirischer Genauigkeit nicht restlos erklärbar sind.

2.3.3 Quantifizierung von Witterungs-Zuwachs-Beziehungen

Dendroökologische Untersuchungen nutzen den Zusammenhang zwischen bestimmten Umweltfaktoren und dem sekundären Dickenwachstum verholzender Pflanzen (siehe 2.3.1). Ob sie an verbautem Holz oder lebenden Bäumen, an "Mooreichen", Bohrkernen aus prähistorischen Brunnen oder Wurzeln erfolgen, sie bauen grundsätzlich auf der Integrationswirkung des Jahrrings auf, der "das Geschehen vergangener Zeiten und das des Wachstumsjahres" widerspiegelt (SCHWEINGRUBER 1983). Am deutlichsten wird dabei der Einfluss von Minimumfaktoren sichtbar, also der Standortparameter, die das Dickenwachs-

¹ Ein plastisches Beispiel für *emergence* auf nichtbiologischem Gebiet stammt von Niels BOHR (zitiert in COOK & PEDERSON 2011), der meinte, es wäre für die Physik zum Beispiel trotz vollständigen Wissens über die Eigenschaften von Wasserstoff und Sauerstoff unmöglich vorherzusagen, dass die chemische Verbindung beider Elemente eine Flüssigkeit sein würde. Mit Blick auf evolutionsbiologische Prozesse ist nach GOULD (2003) der grundsätzlich emergente Charakter der genetischen Codierung zu beachten: Das Genom besteht nicht vorrangig aus linear aufeinander folgenden Vorschriften zur Bildung einzelner Aminosäuren, für die Vererbung sind vielmehr die Interaktionen beziehungsweise die kombinierten Effekte der einzelnen Gene entscheidend.

tum begrenzen (FRITTS 1976; SPEER 2010). Je variabler diese Faktoren von Wachstumsperiode zu Wachstumsperiode sind, desto kurzweiliger können sie sich in wechselnden Jahrringbreiten ausprägen: Veränderungen der Bodennährkraft sind mit sehr langwelligen Trends, Konkurrenzveränderungen mit mittelfristigen Schwankungen verbunden (ESPER et al. 2002), die ständig vorhandene interannuelle Varianz des Radialzuwachses wird hingegen vor allem von den hochvariablen Witterungsgrößen geprägt. In mehrjähriger Rhythmik können akute Störungen zum Beispiel durch biotische Faktoren modifizierend hinzutreten (BÜNTGEN et al. 2008, SPEER 2010; MILLARD & WAY 2011). Auf die Bedingungen in Brandenburg und die Baumart Trauben-Eiche übertragen bedeutet dies, dass vor allem der Einfluss der Wasserverfügbarkeit sowie in geringerem Maße der Temperatur sich in Zuwachsschwankungen niederschlagen müsste (SCHRÖDER et al. 2009b). Dabei ist zu beachten, dass Witterungsparameter in der Regel stark interkorreliert sind (BRIFFA & COOK 1990). Auch für die Bezugsregion gilt zum Beispiel, dass feuchte Sommer hier meist kühler als trockene Sommer und milde Winter häufig feuchter als kalte Winter unter stabilem Hochdruckeinfluss sind (BECK 2007).

Die Stellung der Witterungsfaktoren im Wirkungsgefüge zwischen äußeren Einflüssen und Dickenwachstum des Baumes ist Gegenstand einer großen Zahl von Studien (zum Beispiel SCHWEINGRUBER 1996; BRIFFA et al. 2002; BIGLER et al. 2006; DOBBERTIN & GIUGGIOLA 2006; YUE et al. 2011). Stellvertretend zeigt Abb. 2-11 einen Erklärungsansatz aus dem Standardwerk von FRITTS (1976), in dem die Beziehungen zwischen Witterung und Radialzuwachs als biologisch plausible Verbindungen dargestellt sind. FRITTS erhebt dabei ausdrücklich nicht den Anspruch, die einzelnen mit Pfeilen symbolisierten Zusammenhänge auf einer kausalen Ebene quantifizieren zu können. Es geht ihm vielmehr darum, einen handhabbaren Erklärungsansatz für statistisch eindeutig nachweisbare Beziehungen zu entwickeln. So einfach es nämlich einerseits in vielen Fällen ist, die Beziehungen zwischen Witterungsfaktoren und Jahrringbreiten statistisch zu belegen, so schwierig ist es andererseits, die zu Grunde liegenden kausalen Zusammenhänge im Detail zu erfassen und nachzubilden. Physiologische beziehungsweise prozessorientierte Erklärungsansätze richten sich in der Regel auf die Aktivitäten des Kambiums bei der Zellbildung und auf die nachfolgenden Vorgänge der Differenzierung und Zellstreckung. Sie sind jedoch immer wenigstens teilweise auf Modelle – wie das in Abb. 2-11 dargestellte – als vereinfachende Ausschnitte der hochkomplexen physiologischen Zusammenhänge angewiesen (FRITTS 1976; BECKER et al. 1994; SWIDRAK et al. 2011). Das betrifft zum einen die Modellergänzung in nicht untersuchten Teilbereichen, zum anderen die Evaluierung und Kalibrierung der Modelle (YUE et al. 2011).

Die Prüfung der Beziehungen zwischen Messreihen des Radialzuwachses (beziehungsweise der Jahrringbreite) und Messreihen der Witterungsparameter stützt sich auf Methoden der Zeitreihenanalyse (SCHWEINGRUBER 1983, RIEMER 1994; SPEER 2010). Mit geeigneten statistischen Verfahren werden aus den Jahrringbreitenkurven je nach Untersuchungsziel die enthaltenen "unerwünschten" Variationen (das "Rauschen") so weit wie möglich entfernt, die "erwünschten" hingegen hervorgehoben (NEUMANN 2001). Zu den unerwünschten Ausschlägen der Kurvenverläufe zählen zum Beispiel langwellige Trends wie der Alterstrend, der vor allem bei lichtbedürftigen Pionierbaumarten mit zunehmendem Alter sinkende Jahreszuwächse verursacht (FRITTS 1976; BINKLEY et al. 2002). Langfristig sich verschiebende Konkurrenzgewichte zum Beispiel in Mischbeständen von Baumarten mit unterschiedlichen Lichtansprüchen können ebenfalls zu mittel- und langfristigen fallenden oder steigenden Trends führen (SCHRÖDER 2009b).

Die Trendbereinigung erfolgt in der Regel durch Division der Jahrringbreiten durch entsprechende Werte einer geeigneten Ausgleichsfunktion. Dies führt zu so genannten "Index-Zeitreihen", die trendfrei sind und einen stationären Mittelwert von 1,0 haben (FRITTS 1976; RIEMER 1994). Die Wahl der Ausgleichsfunktion richtet sich nach der Art der herauszuarbeitenden Variation beziehungsweise nach dem Signal, das verstärkt werden soll. Grundsätzlich besteht dabei die Wahlmöglichkeit zwischen *deterministischen* Modellen, die ohne nähere Berücksichtigung der spezifischen Verlaufskurve einen vorab als grundsätzlich wirksam erkannten Trend unterstellen, und einem *empirischen* Vorgehen, das flexible Funktionstypen an die jeweils individuellen Jahrringbreitenkurven anpasst (SPEER 2010). Üblich sind je nach Gestalt der Ausgangskurve neben einigen deterministischen Standardmodellen wie der HUGERSHOFF-Funktion viele verschiedene Typen von linearen über polynomische bis hin zu *Spline*-Funktionen (COOK & KAIRIUKSTIS 1990; BECK et al. 2013). Neben dem Alterstrend kann es auch nötig sein, die Effekte drastischer Änderungen der Bestandesstruktur (Freistellungseffekte nach Durchforstungen oder Störungen) statistisch zu identifizieren und herauszufiltern (NOWACKI & ABRAMS 1997).

In der Regel werden die Witterungs-Zuwachs-Beziehungen nicht anhand einzelner Bäume analysiert, sondern nach Bildung einer "Standortmittelkurve" aus mehreren Bäumen. Die Auswahl der zu beprobenden Bäume ist eine entscheidende Grundlage für die Interpretierbarkeit aller darauf aufbauenden Ergebnisse (SCHWEINGRUBER et al. 1990). Sie richtet sich nach dem Untersuchungsziel und dem Zustand der Bäume beziehungsweise des Bestandes, aus dem die Proben zu nehmen sind: Während für dendroklimatologische Studien am besten Individuen ohne Konkurrenzeinfluss in Frage kommen, wählt man für Analysen des Zuwachsverhaltens verschiedener sozialer Klassen zweckmäßigerweise auch Bäume aus, deren Zuwachs deutlich von Konkurrenz beeinflusst ist (SCHRÖDER 2008). Der Stichprobenumfang hängt ebenfalls von der oder den Zielgröße(n) sowie von der Varianz der relevanten Merkmale in der betrachteten Grundgesamtheit ab und lässt sich theoretisch auf statistischem Weg herleiten. In der Praxis wird man sich nach Erfahrungsgrößen richten und eventuell nach Vorauswertungen bei Bedarf, das heißt bei unerwartet hoher

Merkmalsstreuung, durch zusätzliche Proben nachbessern, wenn dies möglich ist¹. Nicht zuletzt ist der Stichprobenumfang auch abhängig von der Art der entnommenen Proben: Bohrkerne lassen sich meist in kürzerer Zeit und in höherer Zahl entnehmen als Stammscheiben, für die Bäume zu fällen und die häufig wertvollsten Erdstammstücke zu zerteilen sind.

Bevor die Jahrringinformationen vereinheitlicht und aufbereitet werden, ist es notwendig, die Einzelproben zu datieren und durch *cross-dating* zur "Synchronlage" zu bringen. Als Ergebnis sollte jedem sichtbaren Jahrring auf jeder Probe das korrekte Wuchsjahr zugeordnet sein (PILCHER 1990). Obwohl für diesen Arbeitsschritt eine Reihe von Algorithmen und Programmen zur Entscheidungsunterstützung verfügbar sind, bleibt die endgültige Zuordnung abhängig von der Gründlichkeit und Erfahrung der Person, die das Material aufbereitet². Auf Grundlage der synchronisierten Einzelkurven kann dann die weitere Auswertung ablaufen. Die Jahrringinformation durchläuft dabei verschiedene Zwischenstufen, die in Abb. 2-12 für den Fall der "klassischen" Messung der Jahrringbreiten schematisch dargestellt sind. Die Aufbereitung von Dichte- oder Isotopenzeitreihen folgt ähnlichen Algorithmen, zentrale Messgröße ist dann aber nicht die Jahrringbreite.

¹ Als Richtwert zur Erstellung einer verlässlichen Chronologie gibt zum Beispiel SCHWEINGRUBER (1983) eine Zahl von 15 Bäumen an, SPEER (2010) nennt zehn Bäume als Untergrenze und 20 als in Einzelfällen nötigen Maximalwert. NEUMANN (2001) erreichte sogar mit sieben Bäumen (Fichten) hinreichende Repräsentativität.

² "There are many aids to cross-dating available, but the ultimate test remains the personal judgment of the dendrochronologist." (PILCHER 1990)

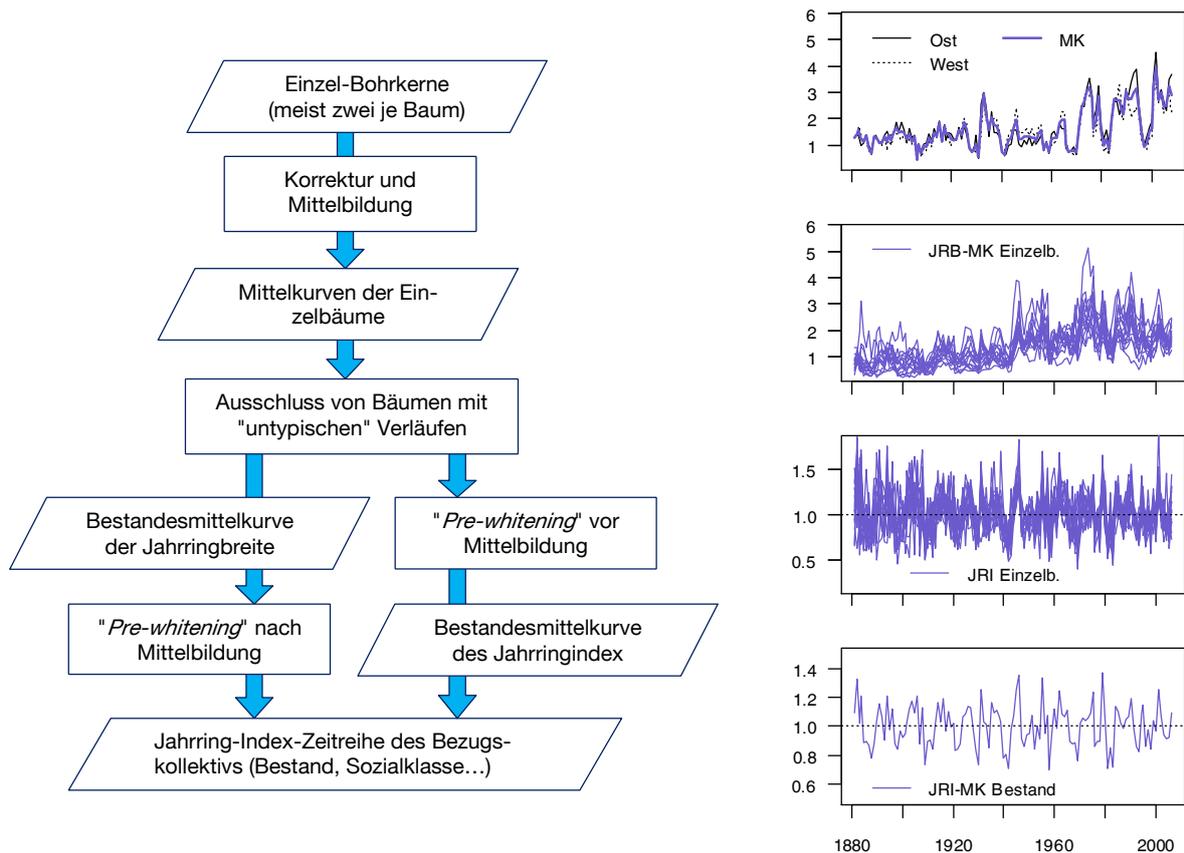


Abb. 2-12: Schema der Informationsaufbereitung für dendroökologische Untersuchungen von den Rohdaten der Jahrringbreiten (JRB) eines Bohrkerens bis zur Jahrring-Index-(JRI-)Zeitreihe als Standortchronologie. Rechts sind beispielhaft die resultierenden Zeitreihen dargestellt (MK = Mittelkurve, Einzelb. = Einzelbäume).

Obwohl auch die auf den Zwischenstufen der Auswertung abgreifbaren Informationen für einzelne Fragen von Bedeutung sein können (siehe unten), ist die wesentliche Zielgröße des Prozesses die Indexkurve als populationsbezogener Ausdruck der Reaktionen auf Witterungssignale (SCHWEINGRUBER 1996). Diese aus repräsentativen Probebäumen hergeleitete, trendbereinigte und mittelwertstationäre Jahrring-Index-Zeitreihe wird entsprechend einer Definition von FRITTS (1976) als "Chronologie" bezeichnet. Eine Chronologie für einen bestimmten, abgrenzbaren Bestand unter charakteristischen Wuchsbedingungen gilt als "Standortchronologie". In Verbindung mit Zeitreihen von Witterungsdaten ist sie die wesentliche Basis für die Modellierung der (bestandesbezogenen) Beziehungen zwischen (Radial-) Zuwachs und Witterung.

Das in Abb. 2-12 dargestellte "pre-whitening" im Sinne einer Reduzierung des "Rauschens" umfasst den bereits beschriebenen Prozess der Trendbereinigung sowie weitere Aufbereitungsschritte, zum Beispiel die Reduzierung des Einflusses von Vorjahreswerten (Autokorrelation) durch eine zusätzliche Indexierung (BECK 2007). Grundsätzlich kann man es entweder auf die Zeitreihe der mittleren Jahrringbreite oder auf die baumindividuellen Zeitreihen der Jahrringbreite anwenden (die Verzweigung im unteren Teil des Ablaufschemas in Abb. 2-12 ist entsprechend als Wahlmöglichkeit zwischen zwei Alternativen zu verstehen). Im zweiten Fall wird die Chronologie als Mittel der Jahrringindex-Zeitreihen berech-

net. Das Verfahren ist zwar methodisch etwas aufwendiger, man erhält jedoch zusätzliches Material zur Herleitung von Parametern, die die Einheitlichkeit der Stichprobe beschreiben, wie zum Beispiel des "*Expressed Population Signal*" oder der mittleren Korrelation zwischen den einzelnen Index-Zeitreihen. Außerdem werden vergleichende Analysen der Varianz im Verhalten zwischen den unterschiedlichen Bäumen ermöglicht. Abschnitt 3.3.1 beschreibt im Detail die im Rahmen dieser Arbeit angewandten Verfahren¹.

Bereits vor Ableitung der Jahrring-Indizes beinhalten auch die aus der ersten Stufe der Datenaufbereitung entstehenden Zeitreihen der Jahrringbreite wichtige Informationen zum ökologischen Verhalten der Einzelbäume und des Bestandes. Charakteristische Kenngrößen sind in diesem Zusammenhang die *Autokorrelation* der Werte sowie die *Sensitivität* der Zeitreihe. Die Autokorrelation als Mittel über einen längeren Zeitraum gibt an, wie stark der statistische Zusammenhang zwischen einem aktuellen Messwert zum Beispiel der Jahrringbreite mit zeitlich vorangegangenen Werten ist. Sie kann deshalb auch als baumspezifische "Pufferung" der Wachstumsreaktionen auf unmittelbar wirkende äußere Einflüsse verstanden werden (SCHWEINGRUBER 1996; BECK 2009). Je höher demnach die Autokorrelation vor allem der ersten Ordnung ist, desto geringer ist die direkte, auf das Wachstum im selben Jahr durchschlagende Wirkung externer Faktoren, die vor allem im Jahresrhythmus variieren. Dies betrifft sowohl negative als auch positive Wachstumsbedingungen: In beiden Fällen ist die Reaktion des Baumes umso mehr verzögert bzw. abgeschwächt, je stärkere autokorrelative Beziehungen gegeben sind.

In umgekehrtem Zusammenhang zur Interpretation der Autokorrelation in Zeitreihen stehen Betrachtungen der *Sensitivität*, die ebenfalls in Form eines Mittelwertes über geeignete Zeiträume beziehungsweise Intervalle berechnet werden sollte. Sie ist ein Maß für die Jahr-zu-Jahr-Schwankung in Zeitreihen und berechnet sich als Verhältnis zwischen der Summe von Vorjahres- und aktuellem Jahr und deren Differenz. Je größer der Sensitivitätswert, desto stärker beeinflussen Umweltfaktoren die Wachstumsrate des Baumes und desto geringer ist die interne Pufferung durch die Entwicklung in der vorangegangenen Zeit. Autokorrelation und Sensitivität können einzelbaumbezogen und darauf aufbauend als Mittelwerte für ganze Stichproben berechnet werden. Trendartige Veränderungen der beiden Parameter über hinreichend lange Zeiträume können somit wichtige Aufschlüsse darüber liefern, ob sich die Empfindlichkeit von Baumarten gegenüber äußeren Einflüssen steigert oder abschwächt (BECK 2009).

2.3.4 Zeitliche Skalenebenen bei der Analyse des Witterungs-Zuwachs-Systems

Die Effekte der Witterung in ihrer wechselnden Ausprägung auf die Zuwachsleistungen der Bäume lassen sich auf verschiedenen Skalenebenen analysieren (FRITTS 1976, BECK 2007). Dies betrifft vor allem die zeitliche Auflösung des Witterungsgeschehens, aber auch das Wachstum im Sinne der Jahrringbreite, das als Ganzes oder in Teilen untersucht werden

¹ Zu den theoretischen Grundlagen der Zeitreihenanalyse vergleiche zum Beispiel RIEMER (1994) und NEUMANN (2001).

kann (BUES et al. 1999; WERF et al. 2007; VIEIRA et al. 2010). Wie im weiter oben beschriebenen Fall der heimischen Eichen verwendet der größte Teil dendroökologischer Studien als Witterungsparameter Informationen zur Temperatur und zum Niederschlag, die in der Regel als Mittelwerte beziehungsweise als Summen in die Analysen eingehen (ESPER et al. 2004), es gibt jedoch auch Untersuchungen zum Einfluss von Extremwerten zum Beispiel der Temperatur oder zur Wirkung von Eis und Waldbränden (SCHWEINGRUBER 1983; BECKER & GLASER 1991). Auf der zeitlichen Ebene sind hinsichtlich der Witterung für die Dendroökologie vor allem drei Skalenebenen maßgeblich:

- Parameterwerte in jährlicher Auflösung (KELLY et al. 2002; BIJAK 2008);
- Mittel- beziehungsweise Summenwerte über feste Zeiträume (zum Beispiel für einzelne Kalendermonate oder die Vegetationsperiode; BRIFFA et al. 2002; NEUMANN 2001; RÖHLE et al. 2010);
- tagesweise aufgelöste Witterungsinformationen, die zu variablen Zeiträumen aggregiert werden können (BECK 2007; SCHRÖDER & BECK 2009; KORPELA et al. 2011).

Zu jedem der beschriebenen Gebiete gibt es umfangreiche Literatur von Standardwerken der Dendroökologie bis zu detaillierten Studien für abgegrenzte Regionen oder einzelne Bestände. Die jeweils gewählte zeitliche Auflösung ist abhängig zum einen vom Ziel der Untersuchung, zum anderen von der Verfügbarkeit der Witterungsdaten: Gerade die langfristigen Witterungsdaten liegen häufig nur als Monatswerte vor. Neben der Konzentration auf eine Ebene sind dabei auch kombinierte Analysen mit Hilfe mehrerer Zeitskalen vertreten (LEBLANC & TERELL 2011). Im Folgenden sollen beispielhaft die Hauptgruppen von Untersuchungsansätzen beschrieben werden, die diese drei Skalenebenen benutzen.

→ *Jahreswerte* wurden besonders in den frühen jahrringbezogenen Untersuchungen zur Quantifizierung der Witterungseinflüsse genutzt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Bestimmung und Analyse von "Signaljahren" für Einzelkurven sowie von "Weiserjahren" für Baumkollektive, von Jahren also, die sich durch auffällige Abweichungen der Jahrringbreite von einem Mittel- beziehungsweise Trendwert auszeichnen (SCHWEINGRUBER et al. 1990; BECK 2007; NEUWIRTH et al. 2007a). Weiserjahre eignen sich gut zum Vergleich der Witterungssensitivität von verschiedenen Beständen, Wuchsgebieten oder auch Baumarten; sie sind eine wichtige Grundlage für das *cross-dating* (siehe 2.3.1) und die korrekte Datierung von Holzproben. Populations- beziehungsweise bestandesbezogene Weiserjahre werden meist auf Grundlage von Schwellenwerten (*thresholds*) definiert. Dabei geht es (a) um ein Mindestmaß an Zuwachsveränderung und (b) um einen Mindestanteil der dadurch betroffenen Bäume am Stichprobenumfang. Sind beide Schwellenwerte überschritten, dann gilt das betreffende Jahr als Weiserjahr. Signifikante Abweichungen von "unbedenklicher" Variabilität der Jahrringbreite werden häufig durch den Vergleich mit gleitenden Mittelwerten identifiziert (MEYER 1999; NEUWIRTH et al. 2007b) oder auf Basis von Erfahrungswerten definiert (DITTMAR & ELLING 1999). Bei ihrer Ermittlung und vergleichenden Diskussionen ist deshalb zu beachten, dass Weiserjahre abhängig vom konkreten Verfahren zu ihrer Bestimmung sind; je nach Methode ergeben sich zum Teil unterschiedliche Häufigkeiten

oder gar abweichende Jahre (BIJAK 2008). Außerhalb der Dendroökologie sind Jahreswerte wichtige Eingangsgrößen zur Modellierung sogenannter "*bioclimate envelopes*" beziehungsweise "Klimahüllen" zur Charakterisierung der Bedingungen für das Vorkommen (Präsenz oder Absenz) von Baumarten – dieses Forschungsgebiet hat gerade in der Diskussion um mögliche Folgen des Klimawandels stark an Bedeutung gewonnen (PEARSON & DAWSON 2003; MBOGGA et al. 2010)¹.

→ Die Verwendung von *Monatswerten* ist in der Dendroökologie am weitesten verbreitet. Das liegt zum einen daran, dass monatlich aggregierte Witterungsinformationen so gut wie überall auch ohne größeren Aufwand verfügbar sind, zum anderen an der Vielzahl etablierter Auswertungsmethoden und Algorithmen. Der Zusammenhang mit der Jahrringbreite wird in der Regel über Korrelationsanalysen (NEUMANN 2001; GRUNDMANN 2009; SCHARNWEBER et al. 2011) oder mit Hilfe von so genannten *response functions* untersucht (FRITTS 1976; GUIOT 1991; BIONDI & WAIKUL 2004). Der erste Schritt dieses mathematisch-statistischen Verfahrens besteht in einer Hauptkomponentenanalyse ("*principal component analysis*", PCA). Sie gruppiert die Einzelvariablen in Form von monatlichen Werten der Witterungsparameter (in der Regel sind das Niederschlagssummen und Mitteltemperaturen) zu Faktoren beziehungsweise Hauptkomponenten. Diese Faktoren grenzen sich durch ihre unterschiedlich starke Wirkung auf die Jahrringbreite ab. Im zweiten Schritt wird die Wirkung dieser "Vektoren" genannten Variablenkombinationen durch Regressionsanalysen quantifiziert. Üblich und biologisch plausibel ist es, neben den Monaten des aktuellen Jahres bis hinein in den Herbst auch die Wuchsperiode des Vorjahres als Einflussgrößen zu betrachten. Bei Betrachtung von Niederschlag und Temperatur ergeben sich so meist mehr als 30 Prädiktoren. Mit dem PCA-Verfahren ist es möglich, das Problem dieser sehr hohen Zahl von Prädiktoren zu reduzieren und durch die Orthogonalisierung der Variablen gleichzeitig die Interkorrelationen zwischen ihnen entscheidend zu minimieren (FRITTS 1976). Ein Nachteil der Methode ist es, dass die gefundenen Beziehungen biologisch schwierig zu interpretieren sind sowie zum Nachweis ihrer statistischen Signifikanz besondere Verfahren notwendig sind (DITTMAR & ELLING 1999; GUIOT 1991).

→ Witterungsparameter in *Tagesauflösung* vergrößern zwar auf den ersten Blick die Zahl der möglichen Einflussgrößen für die statistischen Modelle enorm, sie ermöglichen aber einen deutlich dynamischeren Blick auf das Beziehungsgefüge, der als "die Sicht des Baumes" interpretiert werden kann. Der aktuelle Stand der Rechentechnik erlaubt die systematische Prüfung aller denkbaren Kombinationen und Agglomerationen der Tageswerte auf ihren Einfluss auf die Jahrringbreite (vollständige Enumeration). Dem Interkorrelationsproblem sowie der häufig nicht linearen Wirkung von Witterungsgrößen kann durch das Berücksichtigen zusätzlicher Parameter, zum Beispiel in Form einer multiplikativen Verknüpfung oder der Potenz einer Witterungsgröße, begegnet werden (SCHRÖDER & BECK 2009). Zusätzlich lässt sich eine Hauptkomponentenanalyse in den Ablauf einbinden. Wie

¹ Neben einfachen Jahreswerten (KÖLLING & ZIMMERMANN 2007) verwenden viele *bioclimate envelopes* auch abschnittsbezogene Werte wie zum Beispiel die Temperatur und die klimatische Wasserbilanz in der Vegetationsperiode (GEMBALLA & SCHLUTOW 2007).

im Fall der Analyse von Monatswerten ist es auch hier üblich, die Wirkungen des Vorjahres durch die entsprechende Ausweitung des untersuchten Zeitraumes zu berücksichtigen.

2.4 Klimawandel und Waldumbau

2.4.1 Klima und Witterung

In Anlehnung an FLEMMING (1990) wird mit dem Begriff "Klima" in dieser Arbeit ein mittlerer Zustand der Atmosphäre bezeichnet, wie er im Zusammenwirken der meteorologischen Größen für ein größeres Gebiet über einen längeren Zeitraum (in der Regel mindestens dreißig Jahre) charakteristisch ist. In Abgrenzung dazu steht "Witterung" für die aktuelle Ausprägung des Klimas über kürzere Zeit wie etwa wenige Wochen oder auch eine Vegetationsperiode hinweg (NEUMANN 2001). Wie das Klima ist somit auch die Witterung eine zusammenfassende Größe für das "Wetter", das sich stündlich und täglich abspielt. Die meteorologischen Messgrößen werden in dieser Arbeit als "Witterungsparameter" bezeichnet; im gegebenen Rahmen sind vor allem die Lufttemperatur als Durchschnittswert eines Tages, Monats oder Jahres sowie der Niederschlag als Summe eines Monats oder der Vegetationsperiode von Bedeutung. Informationen zu Klima und Witterung gelten pauschal für einen Bestand bzw. eine Versuchsfläche insgesamt. Für Analysen mit Blick auf den Einzelbaum sind die Witterungsinformationen daher weniger relevant als vielmehr für Vergleiche von verschiedenen Flächen beziehungsweise der mittleren Entwicklung der aufstockenden Bestände.

In Anpassung an die klimatischen Verhältnisse und die darin eingeschlossenen Schwankungen der Witterung haben sich Pflanzengesellschaften entwickelt, deren Verbreitung so wie das Vorkommen einzelner Arten abhängig von klimatischen Größen ist (WOODWARD 1987). Die Abgrenzung forstlicher Wuchsgebiete und Klassifizierung von Waldstandorten zum Beispiel in Deutschland schließt deshalb Angaben zum herrschenden Klima ein, mit denen die Verhältnisse hinsichtlich der durchschnittlichen Niederschläge, der Temperatur und der Luftfeuchte zusammengefasst werden. Die spezifischen Ansprüche beziehungsweise Empfindlichkeiten der Baumarten begrenzen die waldbauliche Handlungsfreiheit ebenso wie die geringen Einflussmöglichkeiten auf die Standortgegebenheiten. Die Berücksichtigung des Klimas bei forstlichen Planungen ist auch deshalb so wichtig, weil einmal getroffene Entscheidungen häufig erst spät sichtbare Reaktionen nach sich ziehen und die Produktionszeiträume so lang wie in keinem anderen Wirtschaftszweig sind.

2.4.2 Veränderungen des Klimas und Reaktionen der Baumarten

Der Begriff des Klimas schließt Schwankungen der Witterung über mittelfristige Zeiträume ein und impliziert dennoch eine gewisse langperiodische Stabilität in Bezug auf eine Region. Die Evolution der Baumarten vollzog sich in Wechselwirkung mit den klimatischen Verhältnissen; die physiologischen Amplituden der einzelnen Arten zeigen an, welche Schwankungen des Klimas für sie tolerierbar sind (KÄTZEL 2008). Darüber hinaus gehende Abwei-

chungen können als Witterungsextreme kurzfristig ebenfalls je nach Anpassungsvermögen beziehungsweise "Elastizität" (siehe Abb. 2-7 und Abschnitt 2.2.3) zu einem bestimmten Maß verkraftet werden. Wenn sich jedoch über längere Zeit der Trend dieser Abweichungen so weit verschiebt, dass mittelfristig neue Durchschnittswerte und damit im engeren Sinne ein "neues" Klima entstehen, dann stellt sich die Frage nach der Anpassungsfähigkeit der Arten an die veränderten Bedingungen. Entscheidend für die Möglichkeiten der Anpassung sind neben dem Ausmaß der Veränderungen auch die Geschwindigkeit, in der sie sich vollziehen, und das neu entstehende Verhältnis zwischen den Witterungsfaktoren¹.

Weltweit sind seit Jahrzehnten systematische Verschiebungen der klimatischen Verhältnisse zu beobachten (MENZEL & FABIAN 1999; MCCARTHY et al. 2001; IPCC 2007). Ihre Folgen sind eine Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur, die Zunahme von Witterungsextremen wie Stürmen und Dürreperioden und Veränderungen in der Ausdehnung von Vegetationszonen (WALTHER et al. 2002). Der als "Klimawandel" bezeichnete Prozess ist mittlerweile nicht mehr nur Forschungsthema, sondern Gegenstand vielfältiger politischer Anstrengungen, sein Fortschreiten zu verlangsamen und seine nachteiligen Folgen zu begrenzen (IPCC 2007). Als Hauptursache gilt die aus dem Verbrauch fossiler Brennstoffe folgende Zunahme des Treibhauseffekts der Atmosphäre (LAUBHANN et al. 2009). Über das Ausmaß, das Tempo und die regional unterschiedlichen Ausprägungen des Klimawandels besteht wegen der Komplexität der zugrundeliegenden Prozesse noch keine hinreichende Klarheit. Vorstellungen über die künftige Entwicklung lassen sich aus Szenarien ableiten, die den Stand der Forschung aufbereiten und die Wahrscheinlichkeit des Eintretens bestimmter Verhältnisse für eine Kombination von Ausgangsbedingungen angeben (IPCC 2000; GERSTENGARBE et al. 2003). Die Auflösung dieser Szenarien reicht von der globalen Ebene bis zu regionalen Angaben über die zu erwartenden Veränderungen mit Hilfe verschiedener Ableitungsverfahren, zum Beispiel durch räumliche Interpolation ("STAR") oder die Schätzung statistischer Verteilungen von Wetterlagen in der Zukunft ("WETTREG", UMWELTBUNDESAMT 2007).

Den Bezugsrahmen für die Schätzungen bildet ein Schema möglicher Entwicklungspfade und der damit verbundenen weltweiten Emissionen klimarelevanter Gase, die das *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) entlang von Annahmen zu unterschiedlichen ökonomisch-sozialen Globalverläufen in einem *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) definiert hat (IPCC 2000). Entsprechend der durch die Forschung zum heutigen Stand gefundenen Beziehungen zwischen Gaskonzentrationen in der Atmosphäre und globaler Mitteltemperatur werden den Grundszenerien zu erwartende Temperaturentwicklungen zugeordnet. Je nach Kombination der Tendenzen im räumlichen Bezug (regional vs. global) und im Eingehen auf Notwendigkeiten nachhaltigen Wirtschaftens (ökonomisch vs. ökologisch) sind als Grundlage aller weiteren Betrachtungen im vierten Bericht

¹ Veränderte Kombinationen der Witterungsfaktoren können drastischere Effekte auf Baumarten haben, als die isolierte Betrachtung der einzelnen Größen nahe legen würde. So führen steigende Temperaturen bei möglicherweise steigenden Niederschlägen, die sich jedoch in die Herbst- und Wintermonate verlagern, zu Verschlechterungen der klimatischen Wasserbilanz und zunehmendem Stress während der Vegetationsperiode.

des IPCC vier Grundscenarien definiert worden, die sich in Unterszenarien verzweigen (siehe Abb. 2-13). Der Buchstabe "A" steht dabei für eine eher von ökonomischen Interessen dominierte Zukunft, "B" kennzeichnet Szenarien, in denen Kenntnisse über ökologische Abhängigkeiten wirksam umgesetzt werden. Die Ziffer "1" steht für eine global relativ einheitliche sozio-ökonomische Entwicklung, die "2" für eine Zukunft mit deutlichen regionalen Unterschieden bei der Auseinandersetzung mit Nachhaltigkeitsfragen (NAKIĆENović & SWART 2000). Aus der Szenariofamilie A1 sind drei Szenariogruppen abgeleitet worden: Die auf hohem Verbrauch fossiler Rohstoffe basierende Gruppe A1FI, die Gruppe A1T mit überwiegender Nutzung erneuerbarer Energien sowie die "balancierte" Gruppe A1B. Im Vergleich mit der seit Erstellung der Szenarien abgelaufenen Entwicklung hat sich "A1B" als am nächsten an der Realität erwiesen. Die meisten aktuellen Studien zum Klimawandel gerade für Mitteleuropa nutzen es nicht zuletzt deshalb als Bezug für Projektionen der Zukunft (UMWELTBUNDESAMT 2006; SPEKAT et al. 2007; LINKE et al. 2010)¹.

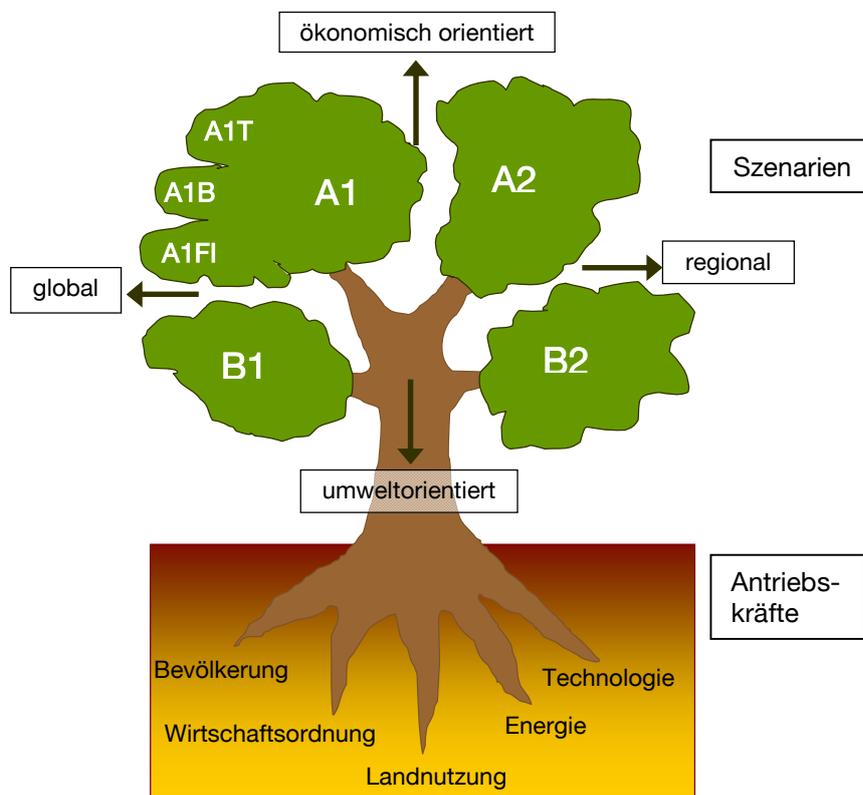


Abb. 2-13: IPCC-Szenarien der zukünftigen sozio-ökonomischen Entwicklung (nach NAKIĆENović & SWART 2000). Aus den Antriebskräften im unteren Bereich der Grafik (Bevölkerung bis Technologie) leiten sich Szenarien ab, die je nach ihrer Orientierung zwischen global einheitlicher und regional differenzierter sowie zwischen ökonomisch dominierter und umweltorientierter Entwicklung unterschiedlich codiert sind.

Für die Forstwirtschaft hat der Klimawandel selbst in seiner schwächsten vorausgesagten Verlaufsform schwerwiegende Auswirkungen (GERSTENGARBE et al. 2003; WOHLGEMUTH 2006; LINDNER et al. 2010, BRESHEARS et al. 2011). Die in Reaktion auf die klimatische Zonierung der Landfläche entstandenen Waldökosysteme sind dem Druck ausgesetzt, sich

¹ Für den 2013/14 erscheinenden 5. Sachstandsbericht des IPCC werden in Weiterentwicklung der Szenarien so genannte "Repräsentative Konzentrationspfade" (*Representative Concentration Pathways*, RCPs) entwickelt, die verschiedene Kombinationen von Strahlungsmengen und Treibhausgaskonzentrationen abbilden (Quelle: <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien> [Abruf am 04.09.2012]).

entweder rasch an veränderte Verhältnisse anzupassen oder mit den sich verschiebenden Standortbedingungen zu "wandern", wo dies möglich ist (zum Beispiel in Gebirgsregionen, wo sich die vertikal geschichteten Wuchsbedingungen nach oben verschieben). Die niedrige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Waldbäume und die vielfältigen Grenzen für räumliches Wandern engen die Reaktionsmöglichkeiten für die Forstwirtschaft stark ein. Der waldbauliche Umgang mit den klimatischen Veränderungen sollte sich deshalb darauf konzentrieren, ein möglichst weites Spektrum an Baumarten mit möglichst breiter Reaktionsnorm bereitzustellen (DUDA 2006; WAGNER 2008).

Die Toleranz der Baumarten gegen Intensität und Dauer extremer Witterung kann näherungsweise durch Untersuchungen an den Grenzbereichen ihres aktuellen Vorkommens hergeleitet werden (BOLTE et al. 2007). In diesem Zusammenhang wird von einem Ausdehnungsbereich ("*leading edge*") und einem Rückzugsbereich ("*rear edge*" oder "*receding edge*") einer Art gesprochen (HAMPE & PETIT 2005; SANCHEZ-SALGUERO et al. 2012). Der Ausdehnungsbereich entsteht, wo zum Beispiel durch den Klimawandel zunehmend Standortverhältnisse entstehen, für die die Art eine hohe autökologische Potenz hat. Rückzugsbereiche ergeben sich analog dazu dort, wo Wuchsbedingungen entstehen, die von der Anpassungsfähigkeit der betreffenden Art nicht mehr abgedeckt werden können. Problematisch für die Ableitung zum Beispiel von Anbauempfehlungen ist die nur schlecht abzuschätzende Wirkung klimatischer Veränderungen auf das Verhältnis der autökologischen zur synökologischen Potenz: Baumarten sind auf Grund ihrer physiologischen Unterschiede auf verschiedene Weise von Standortveränderungen betroffen, was zu Verschiebungen in den Konkurrenzverhältnissen führen kann (BONN 1998; RIGLING et al. 2006, DOBBERTIN et al. 2007). Die Aussagekraft großräumiger Szenarien der Klimaentwicklung und der abgeleiteten Vegetationsveränderungen wird außerdem durch "Reliktorkommen" am "*receding edge*" eingeschränkt (HAMPE & JUMP 2011). Dabei handelt es sich um stabile Vorkommen auf "Inseln", die sich durch begünstigende Abweichungen von allgemein nachteiligen Bedingungen auszeichnen, entweder bezüglich abiotischer Standortbedingungen (Lokalklima, Bodenform) oder durch biotische Faktoren, die außergewöhnlich förderlich wirken können (HAMPE & PETIT 2005).

Ein zweiter zur Zeit häufig diskutierter Ansatz kombiniert die in der Vergangenheit herrschenden mittleren Temperaturen und Niederschläge an allen Standorten, auf denen eine Art vorkommt, zu so genannten "*bioclimate envelopes*" bzw. "Klimahüllen" (PEARSON & DAWSON 2003, KÖLLING & ZIMMERMANN 2007). Diese werden den Faktorenkombinationen gegenübergestellt, die nach den wahrscheinlichsten Szenarien im Verbreitungsgebiet der Art oder in einer Großregion zukünftig herrschen werden (Abb. 2-14). Um die mit den ausgewählten Jahreswerten nur sehr allgemein möglichen Aussagen stärker auf die physiologisch entscheidenden Größen einzugrenzen, wird zur Unterstützung der langfristigen waldbaulichen Planung zum Beispiel in Sachsen nur die Vegetationszeit betrachtet. Deren Länge sowie die summarische klimatische Wasserbilanz sind hier die zu kombinierenden Faktoren (GEMBALLA & SCHLUTOW 2007). An den Klimahüllen allgemein ist vor allem zu kritisieren, dass weder die Einflüsse des Menschen auf die aktuelle geographische Verteilung

2.4.3 Waldumbau als Risikominimierung

Der Begriff "Waldumbau" bezeichnet Planungen und Maßnahmen, die darauf gerichtet sind, durch forstliches Handeln einen Waldzustand zu verändern, der den historisch und regional geprägten Bedürfnissen bzw. Nutzungsansprüchen nicht genügt (KLOTZ 1959; THOMASIVUS 1992). Die seit etwa 1990 verstärkt geführte Diskussion um die langfristige forstliche Planung in Deutschland fasst unter dem Sammelbegriff "Waldumbau" eine ganze Reihe von Maßnahmen zusammen, die einzeln oder im Verbund darauf abzielen, einen "sowohl hinsichtlich der ökologischen Gegebenheiten als auch der funktionellen Erfordernisse optimal strukturierten ..., nachhaltig funktionsfähigen" Zustand der vom Menschen genutzten Wälder zu erreichen (THOMASIVUS 1996). Waldumbau richtet sich demnach auf die planmäßige Veränderung von Forsten, die den ökologischen und gesellschaftlichen Ansprüchen nicht (mehr) genügen, in Richtung natürlicher Vorbilder, die in Abhängigkeit von den Funktionen der jeweils betrachteten Einheiten modifiziert werden (BUTTER 2001).

Eines der Hauptziele, das mit dem Waldumbau erreicht werden soll, ist die Begrenzung bzw. Verminderung von Risiken für die bedürfnisgemäße Nutzung der Wälder. Die schädliche Wirkung biotischer und abiotischer Einflüsse wie Waldbrände oder Insektengradationen auf die Nutzungsmöglichkeiten der Forsten für den Menschen soll reduziert bzw. minimiert werden (STÄHR 2007). Gerade in den von Kiefern-Monokulturen geprägten Wäldern Brandenburgs haben in der Vergangenheit immer wieder größere Schadereignisse erhebliche Mengen Holz entwertet (MÖLLER et al. 2007). Auch im Hinblick auf den Holzmarkt trägt Waldumbau, der zu mehr Laub- und Mischbeständen und damit einer breiteren Palette von Holzarten führt, zur Risikominimierung bei (WAGNER 2008). Die stabilisierenden Wirkungen der Laubholzbeimischung in Kiefernreinbestände können zum Beispiel die Waldbrandgefahr senken und bei Massenvermehrungen der KiefernSchädlinge den Totalverlust der Flächen verhindern. Modellrechnungen haben gezeigt, dass Mischbestände, wie sie zum Beispiel durch aktiven Waldumbau erzeugt werden, besonders auf längere Sicht ökonomische Vorteile gegenüber Reinbeständen aufweisen (KNOKE et al. 2008; PRETZSCH et al. 2010). STÄHR & PETERS (2000) haben den speziellen Fall von Eichen-Kiefern-Beständen im nordostdeutschen Tiefland untersucht, die durch Eichen-Hähersaat entstanden sind. Demnach gibt es rationelle Strategien, die einen höheren Gesamtnutzen der Mischung im Vergleich zum Kiefern-Reinbestand ermöglichen.

Waldumbaumaßnahmen verringern jedoch nicht nur bestimmte Risiken, sondern schaffen auch neue Waldaufbauformen mit eigenen Problemen und Unwägbarkeiten. Das betrifft zum einen die Sägewerke und die Holzverarbeitende Industrie, die sich auf ein verändertes Angebot an Baumarten und Sorten sowie auf mengen- und zeitbezogene Unregelmäßigkeiten in der Rohstoffversorgung einstellen müssen. Mit Blick auf die sich ändernden Wachstumsbedingungen ist außerdem auch für die vom Waldumbau geschaffenen Bestände keineswegs gesichert, dass sie den nur sehr begrenzt kalkulierbaren biotischen und abiotischen Einflüssen standhalten, die mit dem Klimawandel einhergehen. In Sachsen beispielsweise galt die Buche in den vergangenen Jahrzehnten als die Baumart, die vorrangig zum Umbau

instabiler, das heißt windwurf- und borkenkäfergefährdeter Fichtenbestände heranzuziehen war. Die aktuellen Planungsgrundlagen für die Baumartenwahl, die auf Basis der klimatischen Wasserbilanzen erarbeitet wurden, wie sie nach den Klimaszenarien in Sachsen in der Zukunft herrschen werden, stellen jedoch einen dramatischen Rückgang der für Buche geeigneten Witterungsverhältnisse bzw. Waldregionen in Aussicht (GEMBALLA & SCHLUTOW 2007). Waldbaulich ist zu beachten, dass auf Grund ihrer hohen interspezifischen Konkurrenzkraft die Buche für die langfristige Gestaltung von Mischwäldern ungeeignet ist (BURSCHEL & HUSS 1997). Der Langlebigkeit bzw. den langen Produktionszeiträumen der mitteleuropäischen Wirtschaftsbaumarten steht also die vergleichsweise hohe Geschwindigkeit der Umweltveränderungen gegenüber, durch die sich – bei aller noch bestehenden Unklarheit über ihr genaues Ausmaß – die Wuchsbedingungen nicht nur in Sachsen deutlich wandeln werden.

Die hohe Dynamik und das prognostizierte Ausmaß der Standortveränderungen durch den Klimawandel bedrohen nicht nur die Vitalität einzelner Baumarten, sondern lokal unter bereits heute angespannten Wuchsbedingungen auch das Fortbestehen der Vegetationsform Wald (KÄTZEL 2008; MARTÍNEZ-VILALTA et al. 2012). Um dem entgegenzuwirken und die negativen Konsequenzen dieses Wandels für die Forstwirtschaft und die nachgeschalteten Wirtschaftszweige zu begrenzen, bedarf es jedoch keiner übereilten oder radikalen Maßnahmen. Die Beteiligten in der Forstpraxis und in der Forschung sollten dagegen viel stärker als bisher das hohe Maß an Unsicherheit akzeptieren und berücksichtigen, das die langfristige forstliche Planung zunehmend begleiten wird (SPITTLEHOUSE & STEWARD 2003; WAGNER 2004; ERIKSSON et al. 2012).

Strategien und Maßnahmen, die nur auf einen Ausgleich zwischen den sich wandelnden Standortfaktoren und unveränderten Ansprüchen an Leistungen des Waldes zielen, vernachlässigen zu sehr die vielfältigen Unwägbarkeiten, die hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung bestehen. Unsicher sind nicht nur Maß und Richtung im Wandel der Standortfaktoren, sondern auch die Anpassungsfähigkeit der Baumarten, mögliche Verschiebungen im Konkurrenzgefüge zwischen ihnen sowie die vor diesem Hintergrund noch möglichen Leistungen der Bestände für menschliche Bedürfnisse (KIRILENKO & SEDJO 2007; LINDNER et al. 2010). WAGNER (2008) empfiehlt daher, statt eines in erster Linie funktionsgeleiteten Waldumbaus einen vorrangig um den Begriff der Risikoverteilung zentrierten "Nachhaltumbau" zu forcieren, der auf die bestmögliche Erfüllung der Nachhaltigkeitskriterien gerichtet ist. Die im Nachhaltumbau enthaltenen Prinzipien umfassen unter anderem den verstärkten Anbau von Baumarten mit differierenden ökologischen Ansprüchen in Mischbeständen. Diese sollten zur Entspannung der Konkurrenzverhältnisse aus Trupps oder Gruppen gleicher oder ähnlicher Arten aufgebaut sein, die in ihrer Verteilung auf der Fläche entsprechend der Bedürfnisse der Baumarten den Standortunterschieden folgen. Der Risikoverteilung dient außerdem die Steigerung des Anteils störungsunempfindlicher Pionierbaumarten (zum Beispiel Aspe oder Kiefer) sowie der Arten mit zeitiger Fruktifikation und/oder einer weiten ökologischen Amplitude wie Birke oder Eiche (OTTO 1994; KÄTZEL 2008). Der mosaikartige Aufbau fördert durch Streueintrag und Wurzeltätigkeit die

Standortproduktivität, er ist außerdem aus Sicht des Forst- bzw. Waldschutzes zu empfehlen, da er mit einer größeren Habitatvielfalt und einem besseren Nahrungsangebot für natürliche Gegenspieler potentieller Schadinsekten verbunden ist. Er lässt sich schließlich auch waldbaulich sowie technologisch vorteilhafter bewirtschaften als Einzelbaummischungen (FUJIMORI 2001; WAGNER 2008; SCHRÖDER 2009a).

2.5 Präzisierung des Zielsystems

Vor dem Hintergrund des bis hierher beschriebenen Wissensstands bilden die folgenden Annahmen die Grundlage der weiteren Untersuchungen:

- Vitalität wird als Lebens- beziehungsweise Überlebensvermögen definiert, das heißt als Fähigkeit, die wesentlichen Lebensfunktionen aufrechtzuerhalten. Sie bestimmt die Anpassungsfähigkeit der Organismen und Populationen an ihre Umweltbedingungen;
- die Jahrringbreite beziehungsweise der Radialzuwachs ist ein repräsentatives Maß für die jahresbezogene Vitalität der Trauben-Eichen im Untersuchungsgebiet;
- beide Parameter stehen bei interannueller Betrachtung in einer proportionalen Beziehung zueinander, kurzfristige Schwankungen der Jahrringbreite spiegeln "unbedenkliche" Reaktionen auf variable Umweltbedingungen innerhalb eines ökophysiologischen "Normalbereichs" der Vitalität;
- trendhafte, langfristige Veränderungen der mittleren Jahrringbreite können nicht nur einen geänderten Zugang zu Ressourcen anzeigen, sondern auch Aufschluss geben über Verschiebungen im Allokationsgefüge von "*growth or defense*". Ein niedrigeres Niveau jährlicher Radialzuwächse bedeutet nicht zwangsläufig, dass der betroffene Baum oder die Population eine geringe Vitalität aufweisen. Es kann auch bedeuten, dass ökophysiologische Anpassungsreaktionen auf höhere Belastungen durch Umweltfaktoren stattgefunden haben. Weiter zunehmender Stress kann diese Bäume jedoch stärker gefährden als solche mit höheren Jahrringbreiten.

Auf Basis dieser Annahmen sind mit Blick auf die noch offenen Fragen und den aktuellen Forschungsbedarf die in 1.3 formulierten Ziele der Arbeit wie folgt zu konkretisieren:

- (1) Für die Baumart Trauben-Eiche ist mit dendrochronologischen Methoden der Wachstumsverlauf unter den regionalen Witterungsbedingungen auf Basis der vorliegenden Versuchsflächendaten zu analysieren. Dazu gehören
 - die Erstellung repräsentativer Jahrringbreiten- und Jahrringindex-Zeitreihen;
 - die Herleitung und Zusammenstellung der bestandesspezifischen und der flächenübergreifenden Weiserjahre;
 - die Ableitung und Untersuchung möglicher Unterschiede in der Menge und Verteilung der Weiserjahre zwischen den verschiedenen sozialen Schichten der Bestände.
- (2) Auf Basis der Jahrring-Zeitreihen sind die Beziehungen zwischen Witterung und Zuwachs möglichst detailliert zu quantifizieren. Besonderes Augenmerk gilt dem Verhalten dieser Beziehungen im Laufe der Zeit, das mit Hilfe gleitender Intervalle zu charakteri-

sieren ist. Für die Bestimmung der Zuwachsrelevanten Zeiträume und das Beschreiben ihrer möglichen Veränderungen über der Zeit sollen zwei Ansätze mit unterschiedlicher Flexibilität genutzt werden:

- die monatsbasierte Analyse des Witterungs-Zuwachs-Komplexes mit Hilfe der Programme DENDROCLIM2002 beziehungsweise `bootRes`;
- dendroökologische Untersuchungen auf Basis einer vollständigen, objektivierten Variablenauswahl und der statistischen Beziehungen, die sich aus den gefundenen Einflussgrößen ergeben, auf Grundlage des Analysewerkzeugs CLIMTREG.

(3) Die Zusammenführung der Teilergebnisse erfolgt als systematisierender Vergleich der gefundenen statistischen Zusammenhänge mit Einordnung in die Szenarien zur klimatischen Entwicklung der Zukunft in der Bezugsregion. Das schließt ein:

- die Interpretation des historischen Wuchsgeschehens in den Versuchsbeständen vor dem Hintergrund der Stresstheorie und des Vulnerabilitätskonzeptes;
- eine kritische Auseinandersetzung mit den Ergebnissen zur zeitlichen Variabilität der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen;
- die zusammenfassende Abschätzung der Eignung der Trauben-Eiche für den zukünftigen Waldbau in der Untersuchungsregion.

Die Auseinandersetzung mit den dendroklimatologischen Themen soll von folgenden Fragen geleitet sein:

- Unterscheiden sich die Zuwachsreaktionen herrschender Bäume auf die Witterungseinflüsse signifikant von denen beherrschter Bäume?
- Welche Witterungsparameter sind in welchen Zeiträumen im Untersuchungsgebiet am deutlichsten mit der Zuwachsbildung verknüpft?
- Sind gerichtete langfristige Veränderungen in den Witterungs-Zuwachs-Beziehungen nachweisbar?

Die vorliegende Arbeit deckt damit nur einen kleinen Teil des großen konzeptionellen Rahmens ab, den die Abb. 2-10 (Seite 36) aufspannt. Sie konzentriert sich darauf, für die Trauben-Eiche als einer gesellschaftlich relevanten Baumart auf repräsentativen Standorten im subkontinentalen Teil Brandenburgs die Reaktionen im Wachstum auf Witterungsfaktoren quantitativ zu bestimmen und die Implikationen für die Berücksichtigung dieser Baumart bei der Planung künftiger Nutzungssysteme qualitativ abzuschätzen.

3 Material und Methoden

Der folgende Abschnitt beschreibt die Versuchsflächenbasis und die Methodik zur Datenerhebung sowie zur Verarbeitung der gewonnenen Informationen. Die für die Beantwortung der Forschungsfragen nötigen Arbeiten überspannen in der Regel mehrere methodische Ebenen von der Einrichtung der Versuchsflächen über die Datenerfassung im Wald bis zu mathematischen Prozeduren zur Standardisierung von Zeitreihen. Deshalb geht die Methodendarstellung nicht immer bis ins letzte Detail, sondern konzentriert sich darauf, das Zusammenwirken verschiedener Arbeitsschritte vom Ausgangsmaterial bis zur Hypothesenprüfung zu beschreiben. Für weitergehende Fragen verweisen die einzelnen Kapitel auf entsprechende Literatur. Zum Bearbeiten statistischer Probleme und die Erstellung der entsprechenden Grafiken wurden die Programme "Excel für Windows 2007" sowie "R" in der Version 2.12.2 (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2011) herangezogen. Soweit nicht anders angegeben, gilt bei Aussagen zu statistischen Wahrscheinlichkeiten eine Signifikanzschwelle von $\alpha = 0,05$. Die vor allem im Ergebniskapitel häufig verwendeten "*box-whisker-plots*" (kurz: Boxplots) zeigen als hervorgehobene Mittellinie den Median der Verteilung, als *Box* den Interquartilsbereich (IQR). Die *Whiskers* ("Verteilungsenden") umschließen die Verteilung bis zum größten und kleinsten Wert, maximal bis zum Anderthalbfachen des IQR. Darüber hinausgehende Werte (Ausreißer) sind als Punkte (*outlier*) dargestellt (CRAWLEY 2007).

3.1 Datenbasis

3.1.1 Versuchsflächen

Im Sinne der Arbeitshypothesen konzentrierte sich die Zusammenstellung der Datenbasis auf Versuchsflächen, für die sowohl vitalitätsrelevante Parameter als auch Stammfußkoordinaten und Zuwachsdaten vorlagen. Dies ist im Wesentlichen für alle Flächen gegeben, die Gegenstand des "OakChain"- und zum Teil des "INKA-BB"-Projekts waren (SCHRÖDER et al. 2007a; GUERICKE et al. 2010). Sie wurden entsprechend der Themen des Projekts ausgewählt und sind, da die Fragestellung dieser Arbeit einen Ausschnitt aus den dort verfolgten Zielen abdeckt, auch für die hier zu klärenden Probleme geeignet. Aus dem Ziel von OakChain, den Einfluss der Nachbarschaft von Kiefern auf Vitalität und Wachstum der Eiche zu prüfen, folgte die Konzentration auf Mischbestände beider Arten als Ausgangspunkt für die Versuchsflächensuche.

Die Versuchsflächen gliedern sich nach dem Umfang der erhobenen Daten sowie der schwerpunktmäßig untersuchten Hypothesen in *Kernflächen* und *Zusatzflächen*. Die Kernflächen, auf denen auch der Boden- und Humuszustand untersucht, die phänologische Entwicklung beobachtet sowie die genetische Zusammensetzung der Eichenpopulationen analysiert wurden, sind fünf Flächen einer Klima- beziehungsweise Kontinentalitätssequenz ("K1" bis "K5"). Das subkontinentale nordostdeutsche Tiefland als regionale und inhaltliche Orientierung gab den Bezugsrahmen für die Auswahl der Kern- und Zusatzflä-

chen vor: Bis auf die westlichste Kernfläche, die in Sachsen-Anhalt liegt, und die zwei östlichen Flächen in Polen befinden sich alle Versuchsflächen in Brandenburg (Abb. 3-15). Eine Tabelle mit den geografischen Koordinaten der Kernflächen und weiteren Schlüsseigenschaften enthält Anhang 8.2.

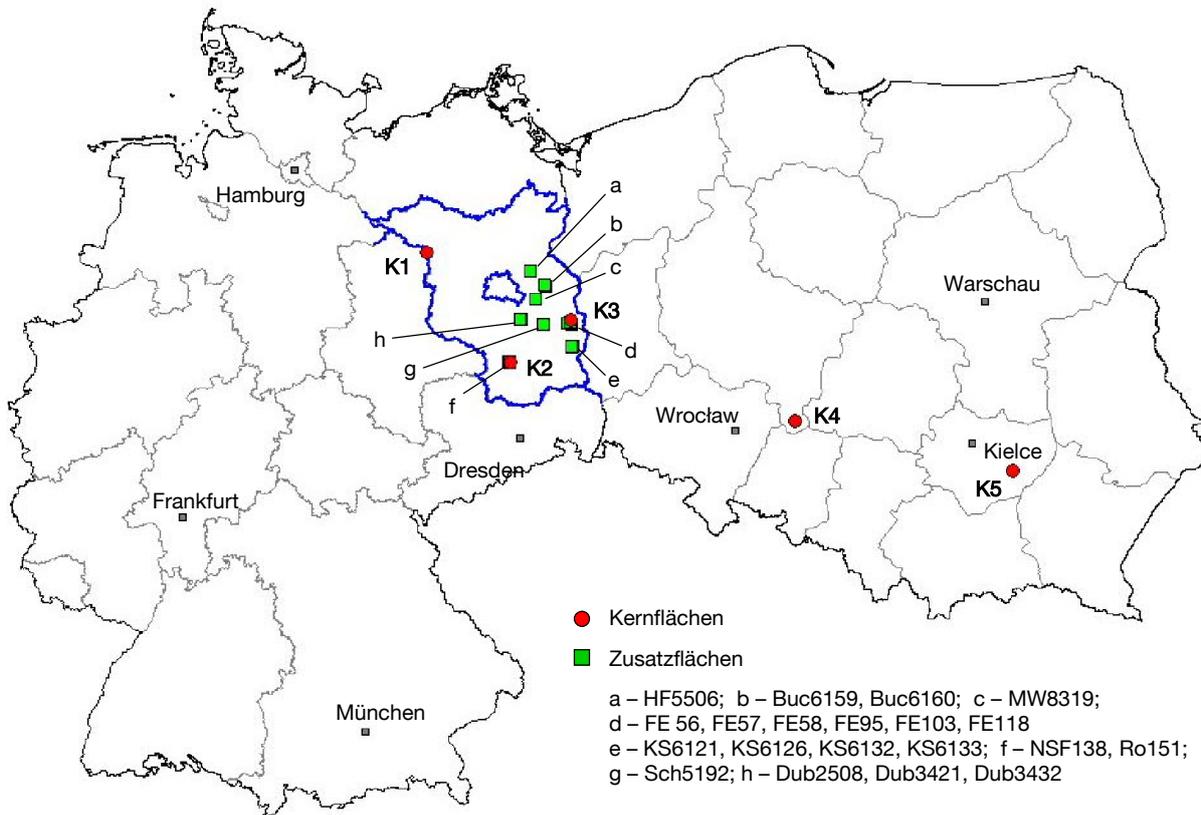


Abb. 3-15: Lage der Kern- und Zusatz-Versuchsflächen (zur Erklärung der Flächenbezeichnungen siehe Tab. 3-1 und Tab. 3-2). Das Bundesland Brandenburg ist blau hervorgehoben. (Quelle: GADM-Projekt / "global administrative areas", www.gadm.org, bearbeitet mit dem freeware-GIS-Programm "Kartenexplorer"; Geodaten zur Lage der Kernflächen: Olaf RÜFFER, LFE)

- Kernflächen -

Die fünf Kern-Versuchsflächen sind entlang eines West-Ost-Gradienten angelegt worden, der vom Osten Sachsens-Anhalts bis nach Südostpolen reicht. Mit dieser Versuchsanordnung soll die Hypothese geprüft werden, die geographische Lage beziehungsweise das dadurch modifizierte Klima bestimme das Niveau der Reaktionen der Eichen auf äußere Einflüsse. Vor dem Hintergrund des Klimawandels wurde bei Anlage der Flächen davon ausgegangen, dass in den östlicher gelegenen Gebieten heute in etwa bereits klimatische Verhältnisse herrschen, wie sie nach den wahrscheinlichsten Szenarien für Nordostdeutschland ab der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts maßgeblich sein könnten. Die Standortparameter der Flächen sind relativ einheitlich: Es handelt sich um terrestrische, durchschnittlich wasserversorgte Sand-Braunerden mittlerer Trophie (vgl. Tab. 3-1). Hinsichtlich der

Altersstruktur und Mischungsart gleichen sich die Flächen ebenfalls, da durchgängig mehr als hundertjährige Trauben-Eichen und Kiefern in Trupp- bis Einzelbaummischung den Hauptbestand bilden (SCHRÖDER et al. 2007a).

Tab. 3-1: Die Klimasequenzflächen (Stand: 01.01.2006 bei Beginn der Aufnahmen; vgl. ELMER et al. 2009)

Fläche	Oberförsterei/Forstbetrieb, Revier, Teilfläche	Bodentyp	Wuchsgebiet ¹	Alter Eiche ²	Alter Kiefer
K1	Forstbetrieb Altmark, Kümernitz 1672 a	podsolige Braunerde	Westprignitz-Altmärker Altmoränenland	(55)-140-(220)	140
K2	Oberförsterei Luckau, Rochau 149 b2	podsolige Pseudogley-Braunerde	Düben-Niederlausitzer Altmoränenland	90 (- 200)	177
K3	Oberförsterei Müllrose, Schernsdorf 156 b3	Pseudogley-Braunerde	Mittelbrandenburger Talsand- und Moränenland	125	121
K4	Forstbezirk Poznan, Obf. Syców, Golejów 97 b	Braunerde	Ebene von Oleśnica, Region Wrocław	110	110
K5	Forstbezirk Radom, Obf. Staszów, Golejów 14 c	Braunerde	Becken von Połaniec, Mittel-Kleinpolnische Hochebene	120	120

¹ Für K4 und K5 sind die zuzuordnenden Gebiete der naturräumlich-geographischen Gliederung Polens nach TRAMPLER et al. (1990) angegeben.

² Altersangaben in Jahren. Werte in Klammern bedeuten, dass neben dem Hauptbestand weitere Altersgruppen der betreffenden Baumart auf der Versuchsfläche vertreten sind.

– Zusatzflächen –

Die Bestände der Kernflächen stocken relativ einheitlich auf grundwasserfernen Standorten mittlerer Trophie und Wasserversorgung. Um auch die Verhältnisse auf etwas schwächeren sowie kräftigeren Standorten analysieren zu können, geht außerdem eine Reihe zusätzlicher Versuchsflächen in die Datengrundlage ein. Sie erweitern die Informationsbasis für die Bearbeitung der Hypothesen auch hinsichtlich verschiedener Alterskombinationen und räumlicher Strukturen. Kiefer und Eiche sind auf den Zusatzflächen ebenfalls einzelbaumweise gemischt, es gibt jedoch in jedem Bestand sowohl Partien mit Eichen- als auch solche mit Kieferndominanz. Das mittlere Baumalter liegt in der Regel hier bei Kiefer höher als bei Eiche, die häufig nicht gleichaltrig, sondern mit einer Altersspanne oder mehreren Altersgruppen im Bestand vertreten ist. Auf Grund dieser oft uneinheitlichen Altersstruktur richtete sich die Auswahl der Flächen nach der Kombination von Mittelhöhe (*hg* nach WEISE) und Trophiestufe in der Klimastufe "Tt" (trockenes Tieflandsklima), um ein möglichst breites Spektrum räumlicher Strukturen und Altersverhältnisse abzudecken (KOPP & SCHWANECKE 1994; und Tab. 3-2). Nicht alle Zusatzflächen mussten neu angelegt werden, einige konnten auch mit Unterstützung durch verschiedene Forschungsvorhaben des Landeskompetenzzentrums Forst Eberswalde bearbeitet werden (STÄHR 2007).

Tab. 3-2: Lage und ausgewählte Bestandesdaten der Zusatzflächen (Stand 01.01.2010)

Name ¹	Oberförsterei / Revier Teilfläche	RW	HW	h	Trophie	Alt TEI	Alt GKI
Buc6159	Müncheberg / Buckow 6159 b7	437844	5819974	60	K	63	152
Buc6160	Müncheberg / Buckow 6160 d	437171	5820619	65	M-K	56	114
Dub2508	Königs Wusterhausen / Dubrow 2508 a1	411674	5784038	40	Z	120	121
Dub3421	Königs Wusterhausen / Dubrow 3421 a7	410467	5783452	40	K	110	110
Dub 3432	Königs Wusterhausen / Dubrow 3432 b3	410021	5783660	40	K	62	57
FE56	Müllrose / Fünfeichen 56 b2	465739	5778903	100	Z-M	128	128
FE57	Müllrose / Fünfeichen 57 a1	465533	5778566	100	M	89	-
FE58	Müllrose / Fünfeichen 58 a4	465078	5779462	100	M	66	101
FE95	Müllrose / Fünfeichen 95 a1	464458	5780421	95	Z-M	95	100
FE103	Müllrose / Fünfeichen 103 a2	461550	5779291	100	Z	62	60
FE118	Müllrose / Fünfeichen 118 b	464307	5781360	105	Z	90	90
HF5506	Bernau / Hrschfelde 5506 c1	421790	5836220	95	K	124	124
KS6121	Pinnow / Kleinsee 6121 b6	465947	5753790	75	Z-M	36	109
KS6126	Pinnow / Kleinsee 6126 a5	467462	5754881	75	M	62	62
KS6132	Pinnow / Kleinsee 6132 a3	465784	5754851	75	Z-M	136	121
KS6133	Pinnow / Kleinsee 6133 a1	466409	5755203	75	Z	89	130
MW8319	Hangelsberg / Mönchwin- kel 8319 a2	427663	5806323	40	Z	61	119
NSF138	Luckau / Neusorgefeld 138 a	399880	5737201	140	M	55-160	55-60
Ro151	Luckau / Rochau 5151 a	399283	5737775	135	M	30-40	103
Sch5192	Schwenow / Schwenow 5192 b2	435098	5779016	40	K	52	143

RW/HW = Rechtswert/Hochwert im UTM-Koordinatensystem, Streifen 33U / ETRS89; h = Höhe [m] über Normalnull; Trophie = Nährkraftstufe nach KOPP & SCHWANECKE 1994; Alt = Altersangaben aus dem "Datenspeicher Wald", geprüft und ggf. korrigiert nach dem Ergebnis der Bohrkern-Stichproben, individuelle Alter besonders bei Eiche können davon abweichen. Alle Flächen liegen in der forstlichen Klimastufe "Tt" (trockenes Tieflandsklima) bis auf NSF138 und Ro151 mit mäßig trockenem Tieflandsklima ("Tm").

Die Konzentration auf den Bereich des trockenen Tieflandsklimas folgt zum einen daraus, dass die Trauben-Eiche vor allem in trockeneren, subkontinentalen Gebieten eine dominante Rolle in der potentiellen natürlichen Vegetation spielt, während sie bei feuchteren Verhältnissen der Rotbuche in der Konkurrenz unterlegen ist (HOFMANN & POMMER 2005). Ein zweiter Grund ist die hohe Wahrscheinlichkeit, mit der sich zukünftig die Witterung in vielen Regionen des nordostdeutschen Tieflands in Richtung höherer Trockenheit im Sommer verschieben wird (GERSTENGARBE et al. 2003; UBA 2007; LINKE 2010; vgl. Ab-

¹ Im Gegensatz zu den Kernflächen wurden hier Namen verwendet, die auf den ersten Blick die Lage der Zusatzflächen mit Revier und Abteilung andeuten. Da es sich zum Teil um Versuchsflächen handelt, die vom LFE sowie im Projekt "INKA BB" an der Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde bearbeitet werden, soll deren Zuordnung dadurch leichter möglich sein. Außerdem lässt sich die Zugehörigkeit zu einzelnen regionalen Schwerpunkten so besser erkennen.

schnitt 2.4.2). Alle Flächen wurden in Beständen angelegt, die im Besitz des Landes Brandenburg stehen, da die organisatorischen Vorklärungen hier wesentlich einfacher waren und die örtlichen Wirtschaftler die Bohrkern-Entnahme genehmigten.

Bei der Einrichtung der Kern- und Zusatzversuchsflächen wurden Flächengrößen gewählt, die hinsichtlich der darauf stockenden Bäume statistisch zuverlässige Stichprobenzahlen für die verschiedenen Auswertungen gewährleisten. Die obere Grenze bildeten Baumzahlen, die mit den gegebenen Möglichkeiten noch zu verarbeiten waren; in einigen Fällen bestimmten auch Struktur und Form der betreffenden Teilfläche die mögliche Versuchsflächengröße. Die Methodik zur erstmaligen Einrichtung der Flächen sowie zur Erfassung der waldwachstumskundlichen Parameter folgte im Wesentlichen den Grundsätzen, die im Arbeitsgebiet "Langfristige Versuchsflächen" am Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde maßgeblich sind¹.

3.1.2 Klimatische Einordnung der Flächen

Nach der klimatischen Gliederung von Brandenburg liegt die westlichste Fläche K1 im Großklimabereich δ ("schwächer maritim beeinflusstes Altmärkisches Klima"). Die Fläche K2 befindet sich im Gebiet des "kontinental beeinflussten Südmärkischen Klimas" (Großklimabereich γ); K3 liegt im "hochcollin beeinflussten Lausitzer Klima" (Großklimabereich ϕ ; alle Angaben nach KOPP und SCHWANECKE 1994). Hinsichtlich ihrer Stamm-Standortformengruppe sind K1 und K2 demnach der Klimastufe "Tm" (mäßig trockenes Tiefland), K3 dagegen der Klimastufe "Tt" (trockenes Tiefland) zuzuordnen (alle Angaben nach KOPP und SCHWANECKE 1994). Für die polnischen KS-Flächen ist die Einordnung in dieses Schema nicht möglich. Nach der dort üblichen physisch-geographischen Klassifizierung gehört K4 zum Klimabezirk des mittelpolnischen Tieflands, darin zur Makroregion der Ebene von Śląsk (Schlesien) und darin zur Mesoregion "Ebene von Oleśnica". K5 ist dem Bezirk "Kleinpolnische Hochebene", der Makroregion "Hochland von Kielce" und der Mesoregion der Vorberge von Szydłów zuzuordnen (KONDRACKI 1998). Die Zusatzflächen befinden sich zum größten Teil im trockenen Tieflandsklima und ordnen sich etwa auf dem Niveau von K3 ein, genauere Angaben sind meist wegen des Fehlens direkt benachbarter Klimastationen nicht möglich.

Der Vergleich der mittleren Werte von Niederschlag und Temperatur zeigt, dass der Fläche K1 während der Vegetationsperiode die geringsten, der Fläche K5 die höchsten Niederschlagssummen zur Verfügung stehen (Tab. 3-3). Die klimatische Wasserbilanz kWb als Differenz der Niederschläge und der potentiellen Evapotranspiration weist hingegen in Bezug auf die Vegetationsperiode K3 als die trockenste, K4 als die feuchteste der Kernflächen aus. Zum vereinfachten Vergleich der geographisch verschiedenen Standorte werden weiterhin der Trockenheitsindex TI nach DE MARTONNE (1926) und der Kontinentalität-

¹ Zu Einzelheiten siehe ERTELD (1955) sowie NOACK (2007; beides unveröffentlichte Manuskripte). Einschränkend ist zu erwähnen, dass hinsichtlich der Wuchsbedingungen lediglich die Angaben der Standortserkundung im Datenspeicher Wald übernommen wurden, ohne eigene Untersuchungen anzustellen.

sindex K betrachtet (GORCZYNSKI 1920). Ein niedriger TI-Wert zeigt eine relativ hohe Trockenheit an, ein niedriger K ist gleichbedeutend mit vergleichsweise geringer Kontinentalität (CUFAR et al. 2008; zur Berechnung der Indizes siehe 3.4.1).

Tab. 3-3: Klimatische Kenngrößen der Klimasequenz-Versuchsflächen als Mittelwerte 1961-1990. Die kWb-Werte sind SUCKOW et al. (2009) entnommen; Abkürzungen sind im Text erklärt.

Fläche	TI	K	Jahr			Vegetationsperiode Mai-Sept.		
			T [°C]	N [mm]	kWb [mm]	T [°C]	N [mm]	kWb [mm]
K1	351	18,2	8,5	531	-233	15,2	255	-252
K2	365	19,6	8,3	589	-186	15,2	291	-223
K3	338	20,7	8,9	521	-294	16,2	267	-272
K4	358	23,4	8,5	552	-220	15,9	317	-111
K5	432	26,1	7,7	637	-184	15,4	372	-156

Der Kontinentalitätsindex steigt von West nach Ost und belegt damit eine Zunahme der Temperaturdifferenz zwischen Sommer und Winter, die sich vor allem für K5 durch deutlich kälteres Klima im Winter ergibt. Der Trockenheitsindex hingegen bestätigt die an der klimatischen Wasserbilanz ablesbare Rangfolge, nach der in der Mitte der Klimasequenz der potentielle Trockenstress für die Pflanzen am höchsten, auf den Flächen K2 und K5 jedoch vergleichsweise gering ist. Bemerkenswert sind die geringen Niederschläge und die resultierende stark negative kWb für K1, die damit die Fläche mit den zweitniedrigsten Werten für TI und kWb nach K3 darstellt, obwohl noch relativ starke subatlantische Einflüsse auf das Klima bestehen.

3.1.3 Bestandesgeschichte

Der forsthistorische Hintergrund der Versuchsflächen ist vor allem für die Bestände der Klimasequenz recherchiert worden (SCHRÖDER et al. 2009b). Danach befinden sich alle diese Flächen in Waldkomplexen, für die eine durchgängige Bestockung mit Wald seit dem Mittelalter angenommen werden kann: der "Hohen Heide" bei Havelberg (K1), der "Rochauer Heide" zwischen Luckau und Hohenbucko (K2) sowie im Gebiet der ehemaligen Oberförsterei Siehdichum bei Müllrose in Ostbrandenburg (K3; HÖHNE & MARQUARDT 2007, 2009). Auch K4 ist nach den vorliegenden Informationen und Karten ein älterer Waldstandort. Bei der Fläche K5 in Südostpolen besteht hingegen Unsicherheit: Ihre direkte Nähe zu Siedlungen, die Beimischung seltener Baumarten und ein regelmäßig gewelltes Relief könnten eine nichtforstliche Landnutzung in der Vergangenheit anzeigen.

Allen Flächen ist gemeinsam, dass Trauben-Eiche und Kiefer dort seit langer Zeit vergesellschaftet sind, zum Teil als Einzelbaum-Mischung (K1, K2, K4), zum Teil in Form artreiner Gruppen oder Horste (K3, K5). Der größte Teil der Bäume geht auf natürliche Verjüngung zurück, auf einigen Flächen gab es ergänzende Saat- (K1, K2 und K3) und/oder Pflanzungsmaßnahmen (K1). Da sich die Naturverjüngung über längere Zeit erstreckte, findet man heute auf vielen Flächen besonders bei der Eiche Bäume unterschiedlichen Alters, in

einzelnen Fällen (K1, K2) auch mehrere Generationen. Auf einigen Zusatzflächen ist die Eichenschicht mehrheitlich aus "Hähersaat" unter geschlossenem Kieferschirm hervorgegangen, das heißt aus Eicheln, die der Eichelhäher *Garrulus glandarius* L. als Nahrungsreserve im Waldboden versteckt hat. Auf die Entstehung der Bestände auf den Zusatzflächen soll hier nicht im Einzelnen eingegangen werden, da diese zum einen nicht im gleichen Maße wie die der KS-Flächen erforscht wurde, zum anderen im Vergleich zu vielfältig wäre, um hier angemessenen dargestellt zu werden.

Während der Ursprung der Bestände auf den Versuchsflächen relativ zuverlässig ermittelt werden konnte, ließ sich ihre Nutzungsgeschichte nur unzureichend rekonstruieren. Zum einen standen Daten oder Karten, die Aussagen über Ernte- bzw. Durchforstungsmengen sowie grundsätzliche Eigenschaften des ausscheidenden Bestandes enthielten, nur im Ausnahmefall zur Verfügung. Außerdem ist der räumliche Bezug der verfügbaren Informationen im Regelfall die gesamte Abteilung; auf Grund zu großer Variabilität in der horizontalen und/oder vertikalen Struktur war eine anteilmäßige Übertragung dieser Daten auf die Versuchsfläche nicht möglich.

Einige Grundlinien der Bestandesbehandlung lassen sich jedoch aus den forsthistorischen Quellen und dem aktuellen Zustand der Bestände ableiten. Danach erfolgte dort, wo die Baumarten eher räumlich getrennt vorkommen, auch eine getrennte, "baumartenreine" Behandlung, die oft auch mit einer höheren durchschnittlichen Schaftqualität der Bäume verbunden ist (BÄUCKER et al. 2009, 2010). Eine Ausnahme bildet der Bestand auf K4, auf dem die Baumarten zwar einzelbaumweise gemischt sind, dessen Trauben-Eichen aber einen anerkannten Saatgutbestand bilden. Hier gab es auch eine qualitätsorientierte Durchforstung, die allerdings, da kein Unterstand vorhanden ist, die Bildung qualitätsmindernder Wasserreiser an den Eichen nicht verhindern konnte.

In den anderen Beständen mit Einzelbaummischung wurde in der Regel kein Durchforstungsregime verfolgt, das auf einen hohen Wert des verbleibenden Bestandes gerichtet gewesen wäre. Hier ging es eher darum, im Zuge von Sortimentshieben geeignete Stämme zu entnehmen sowie seit den 1990er Jahren durch forstsanitäre Eingriffe hauptsächlich absterbende Trauben-Eichen vor dem endgültigen Wertverlust zu nutzen. Die Folge sind Bestände wie K1 und K2, in denen nur wenige Trauben-Eichen befriedigende Schaftqualitäten aufweisen (BÄUCKER & BUES 2009). Vor allem mit Blick auf das Aufstellen langfristiger Zuwachszeitreihen ist außerdem zu beachten, dass der größte Teil gerade der Trauben-Eichen nicht durchgängig der herrschenden Bestandesschicht angehörte. Zum einen blieben sie infolge ihres artspezifischen Wuchsverhaltens längere Zeit in der Höhe hinter den Kiefern der unmittelbaren Umgebung zurück, zum anderen sind vorherrschende Trauben-Eichen mit guten Schaftformen immer wieder bei Vornutzungen entnommen worden, wodurch die verbleibenden erst spät in die herrschende Schicht aufrückten¹.

¹ In einzelnen Fällen (zum Beispiel in der Rochauer Heide, Oberförsterei Luckau) ist die im Durchschnitt schlechte Qualität der Eichen auch eine Folge von "Reparationshieben" nach dem zweiten Weltkrieg, die hauptsächlich gut geformte Bäume entnahmen (HÖHNE & MARQUARDT 2009).

3.1.4 Verteilung auf soziale Gruppen, Stammzahlen und Flächengrößen

Hinsichtlich ihrer horizontalen Struktur sind die untersuchten Bestände der Klimasequenz als "Einschichtenwälder" nach OTTO (1994) einzuordnen. Auch die ältesten der Zusatzflächen gehören zu diesem Strukturtyp, während die Gruppe der Zusatzflächen mit den jüngeren Eichen durch Zweischichtigkeit mit der Kiefer im oberen und der Eiche in der unteren Bestandesschicht geprägt sind. In Bezug auf die Untersuchungsfrage, ob es Unterschiede in Wachstum und Entwicklung in Abhängigkeit von der sozialen Stellung der Einzelbäume gibt, bietet sich die weitere Unterteilung der Baumarten in Gruppen an.

Prinzipiell ließe sich die Gruppeneinteilung entweder relativ oder absolut vornehmen: Die relative Klassifizierung berücksichtigt die Werteverteilung in der untersuchten Stichprobe, indem die Spannweite zwischen oberer und unterer Grenze in Klassen mit etwa gleich vielen Bäumen unterteilt wird (DROBYSHEV et al. 2007). Die absolute Einordnung richtet sich nach einem externen Standard, der aus der Literatur, aus Voruntersuchungen oder aus Analysen abgeleitet wird, auf die man sich in der eigenen Auswertung beziehen möchte (HERTEL & ZASPEL 1996). Dieser Ansatz kommt im Folgenden zum Tragen, um Gruppen je nach individueller Stellung im sozialen beziehungsweise Konkurrenzgefüge der Bestände zu bilden.

Der soziale Status eines Baumes¹ ist in der Regel nicht allein durch einzelne messbare Merkmale wie die Höhe oder den Durchmesser zu charakterisieren. Ein übliches und auch hier angewandtes Verfahren besteht darin, die Bäume entsprechend der sozialen Stellung nach KRAFT (1884) in "Baumklassen" einzuteilen. In den Beständen mit Eiche in der zweiten Schicht wird diese konzeptionell als eigener "Bestand" betrachtet und so angesprochen, als gäbe es die beherrschende Kieferschicht nicht. Zur Klassifizierung wird folgender Schlüssel nach OTTO (1994) verwendet, der sich seinerseits auf KRAFT sowie auf RÖHRIG et al. (1982) bezieht:

- Klasse 1: *Vorherrschende* Bäume, die im Kronenraum weitgehend konkurrenzfrei sind und in der Höhe über dem Bestandesdurchschnitt liegen;
- Klasse 2: *Herrschende* Bäume mit Konkurrenzvorteilen gegenüber Nachbarbäumen, die in der Höhe etwa dem Mittelwert des Bestandes entsprechen;
- Klasse 3: *Gering mitherrschende* Bäume, die nur eingeschränkten Zugang zu den physiologisch notwendigen Ressourcen haben und sich im unteren Teil der Kronenschicht befinden;
- Klasse 4: *Beherrschte, unterdrückte* Bäume mit erheblichen Konkurrenznachteilen, deren oberste Kronenteile sich an der unteren Grenze der Kronenschicht befinden;

¹ Unter dem sozialen Status wird hier die Position des Baumes in der Konkurrenzhierarchie eines Bestandes verstanden, die ausschlaggebend ist für seine Zugriffsmöglichkeiten auf Ressourcen wie Wuchsraum, Licht, Wasser und Nährstoffe.

- Klasse 5: *absterbende oder bereits abgestorbene* Bäume ohne wirkliche Teilhabe am geschlossenen Kronendach.

Für die getrennte Auswertung von Gruppen mit verschiedenem sozialem Status werden die Klassen 1 und 2 zum "herrschenden Bestand" ("1+2") und die Klassen 3 und 4 zum "beherrschten Bestand" ("3+4") zusammengefasst. Absterbende oder tote Bäume der Klasse 5 wurden von den Analysen nicht erfasst. Im Folgenden werden zur Bezeichnung der beiden "Sozialklassen" auf den einzelnen Flächen auch häufig Kürzel wie "K1.12" (für den herrschenden Bestand auf K1) oder "K4.34" (beherrschter Bestand auf K4) verwendet.

Je nach Alter, Bestandesdichte und Flächengröße schließen die Untersuchungen unterschiedliche Baumzahlen ein. Da es sich um Mischbestände handelt, gibt die folgende Tab. 3-4 neben den Zahlen für Eiche auch die Werte für die beigemischten Kiefern und eventuell vorhandene andere Baumarten an. Für die Kernflächen sind außerdem die Baumzahlen in den Sozialklassen 1+2 und 3+4 ausgewiesen.

Tab. 3-4: Stammzahlen und Flächengrößen der Kern- und Zusatzversuchsflächen (Stand 01.01.2010)

VFL		A [ha]	n TEI	n GKI	n Rest	VFL	A [ha]	n TEI	n GKI	n Rest
K1	1+2	1,00	63	84	-	Buc6159	0,20	146	18	16
	3+4		58	16	-	Buc6160	0,20	72	33	69
K2	1+2	1,00	31	92	-	Dub2508	0,25	29	26	-
	3+4		99	17	-	Dub3421	0,25	60	24	-
K3	1+2	1,00	128	34	-	Dub 3432	0,20	143	53	-
	3+4		131	18	17	FE56	0,47	151	21	3
K4	1+2	1,00	109	67	-	FE57	0,27	201	-	1
	3+4		43	4	-	FE58	0,20	231	32	1
K5	1+2	0,75	69	67	-	FE95	0,20	88	41	-
	3+4		21	13	20	FE103	0,20	332	67	1
					FE118	0,20	67	71	9	
					HF5506	0,25	30	14	35	
					KS6121	0,20	135	55	3	
					KS6126	0,20	129	122	6	
					KS6132	0,25	43	17	9	
					KS6133	0,25	101	16	-	
					MW8319	0,20	78	54	2	
					NSF138	0,75	243	252	7	
					Ro151	0,25	356	67	-	
					Sch5192	0,25	229	12	1	

VFL = Versuchsfläche, A = Versuchsflächengröße, n = Stammzahl auf der Versuchsfläche, TEI = Trauben-Eiche, GKI = Gemeine Kiefer, Rest = übrige Baumarten (Sand-Birke, Rot-Buche, Eberesche, Hainbuche, Fichte)

3.2 Methodik der Vitalitätseinschätzung

Zur Einschätzung der Vitalität dient der summarisch angesprochene individuelle Kronenzustand der Trauben-Eichen in der laublosen Phase ("Kronenstruktur") und im Hochsommer ("Laubverlust"). Im Folgenden sind die Einzelheiten zur Vorgehensweise bei der Erhebung der beiden Parameter dargestellt. Die mehrfache Aufnahme der Kernflächen

macht es möglich, dort die Entwicklung des Belaubungszustands und der Kronenstruktur über mehrere Jahre zu verfolgen. Auf den Zusatzflächen erfolgte in der Regel nur eine einmalige Aufnahme der Vitalitätsindikatoren an den mit Bohrkernen beprobten Bäumen; da die Datenaufnahme dort in der Regel im Winterhalbjahr stattfand, ist neben der überall angesprochenen Kronenstruktur nur in Ausnahmefällen auch der Belaubungszustand erfasst worden.

3.2.1 Kronenstruktur

Die Klassifizierung der Kronenstruktur (*KSt*) im Winterzustand erfolgt nach dem von KÖRVER et al. (1999) aufgestellten Schema, das acht Stufen fortschreitender Auflösung der Krone und damit des Vitalitätsverlusts beschreibt. Hauptindikator für die Einordnung in die acht Klassen von 1 ("Optimal- bzw. Referenzstadium") bis 8 ("Zerfalls- bzw. Rudimentstadium") ist die Verzweigungsstruktur in der Krone. Dazu werden das Vorhandensein und die Verteilung von Feinreisig sowie der Anteil toter oder absterbender Äste eingeschätzt (Abb. 3-16). Die Autoren erarbeiteten ihr Schema für die Ansprache von Alteichen mit Kronen, die sich in der oberen Bestandesschicht entwickeln konnten¹. Unterständigen bzw. zurückbleibenden Bäumen mit nur unvollständig ausgebildeten Kronen wurde deshalb auch bei Erfassung des Vitalitätszustandes auf den Kernflächen (3.1.1) keine Kronenstrukturstufe zugeordnet. Für die mit Bohrkernen beprobten Eichen der Zusatzflächen liegt in jedem Fall ein *KSt*-Wert vor. In Beständen jüngeren Alters wurde das KÖRVER-Verfahren so modifiziert, dass das Kontinuum des Kronenzustands ebenfalls in acht Klassen von "optimal" bis "zerfallend" gegliedert und die Probestämme darin eingeordnet wurden².



Abb. 3-16: Beispiele für Schätzhilfen zur Einstufung der Kronenstruktur (*KSt*) von Alteichen nach dem System von KÖRVER et al. (1999). Links: "Referenz-Stadium" der *KSt*-Stufe 1, rechts: "Rudiment-Stadium" der *KSt*-Stufe 8 (Fotos entnommen aus KÖRVER et al. 1999).

¹ Als "Alteichen" gelten Bäume, die mindestens 75 % ihrer Endhöhe laut Ertragstafel erreicht haben bzw. bei denen die Leittriebe keinen dominierenden Einfluss mehr auf das Erscheinungsbild der Krone ausüben (KÖRVER et al. 1999).

² Die Rangfolge wurde "absolut" festgelegt mit einem gedachten Idealbaum als Bezug für die beste Stufe 1 und einer zerfallenden, absterbenden Grobastkrone als Stufe 8, um für alle Bestände dasselbe Maß verwenden zu können.

3.2.2 Belaubungszustand

Der Sommerzustand der Krone wird nach der Methode der Waldzustandserhebung (WZE) als prozentualer Unterschied der tatsächlichen Belaubung zur potentiellen Belaubung des betrachteten Baumes erfasst (EICHHORN et al. 2006). Bezugsgröße ist dabei nicht die komplette, vollständig geschlossene Krone, sondern nur der Bereich der Lichtkrone, der potentiell Blätter tragen könnte und nicht durch Abwesenheit von Ästen oder die Konkurrenzwirkung von Nachbarbäumen daran gehindert ist (Abb. 3-17). Ein Wert von 25 % für den Laubverlust ("Lbv") bedeutet demnach, dass ein Viertel der Laubmasse, die nach der gegebenen Kronenstruktur im Lichtbereich der Krone vorhanden sein müsste, fehlt. Wie im Fall der winterlichen Kronenstruktur werden nur "Alteichen" der herrschenden Bestandesschicht (Stammklassen 1, 2 und teilweise 3 nach KRAFT [1884]) angesprochen. Da ein großer Teil der Zusatzflächen während der Vegetationsruhe aufgenommen wurde, gibt es für diese in der Regel keine Laubverlust-Werte.

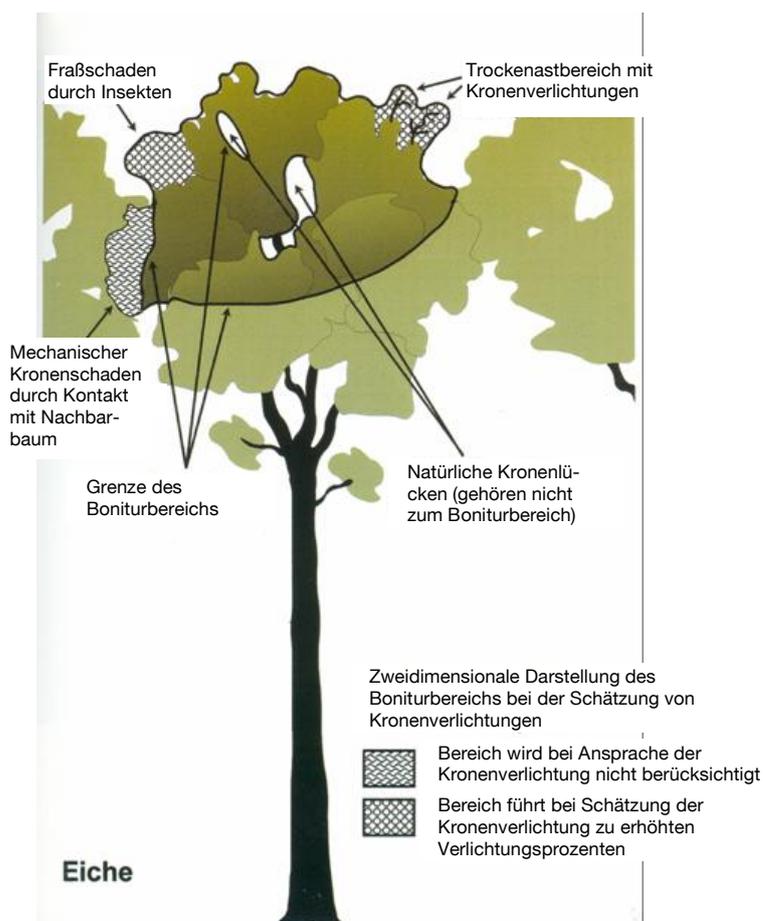


Abb. 3-17: Vorgehen bei der Schätzung der Kronenverlichtung nach Methodik der Waldzustandserhebung (aus EICHHORN et al. 2006)

Für die Analysen in dieser Arbeit wird nur das Merkmal "Kronenverlichtung" im Sinne des prozentualen Laubverlusts (*Lbv*) genutzt, obwohl die WZE auch weitere Erscheinungen wie Laubvergilbungen berücksichtigt. Der übliche Zeitraum für die Erhebung liegt nach Abschluss der Laubentwicklung im August. Auf den Zusatzflächen erfolgte eine einmalige Aufnahme der Vitalitätsparameter in den Jahren 2007 oder 2008. Für die Kernflächen, auf denen Kronenstruktur und Laubverlust in den Jahren 2006-2010 (K1-K3) bzw. 2006-2008 (restliche Flächen) erhoben wurden, gilt der arithmetische Mittelwert der Ansprachen als Bezugsgröße.

3.2.3 Beziehungen zwischen den Vitalitätsindikatoren

Die Zusammenhänge zwischen Kronenstruktur und Belaubungszustand sollen nur anhand der Flächen K1-K5 untersucht werden, da dort durch die Bildung mittlerer Werte je Baum über mehrere Jahre zufällige Fehler bei der Datenaufnahme minimiert sind. Außerdem haben die Trauben-Eichen nur dort (neben einzelnen Zusatzflächen) ein Alter, für das die Aufnahmemethodik für beide Parameter anwendbar ist. Die vergleichende Betrachtung von *KSt* und *Lbv* soll eine Einschätzung dazu ermöglichen, inwieweit ein Vitalitätsindikator den jeweils anderen wiedergeben kann. Dazu wird flächenbezogen sowie in der Gesamtschau über alle fünf Flächen der Klimasequenz die Korrelation zwischen Laubverlust und Kronenstrukturstufe untersucht. Zusätzlich ist von Interesse, ob sich die Ergebnisse der Klassifizierung der einzelnen Bäume durch die beiden Parameter vergleichen lassen, das heißt ob die Rangfolge der Bäume vom vitalsten zum am wenigsten vitalen Individuum durch beide Anspracheverfahren in ähnlicher Weise zustande kommt. Zur Beurteilung dieser Thematik wird der Rangkorrelationsindex nach *Spearman* herangezogen.

3.3 Zuwachsquantifizierung und dendrochronologische Methodik

Der waldwachstumskundliche status quo der Versuchsflächen wurde nach Standardverfahren aufgenommen, wie sie zum Beispiel für die Bearbeitung der Versuchsflächen des Landeskompentenzentrums Forst in Eberswalde anzuwenden sind (NOACK 2007, unveröffentlicht). Für alle Bäume über 1,3 m Höhe erfolgte die Bestimmung der Baumart, des Brusthöhendurchmessers mit Rinde (BHD), der Baumklasse nach KRAFT (1884, in OTTO 1994) sowie der Baumposition in einem rechtwinkligen Ost-Nord-Koordinatensystem. Zur Ermittlung des BHD durch Kreuzklappung diente eine Haglöf-Mantax[®] Computerkluppe, zur Bestimmung der Baumpositionen ein elektronisches Tachymeter Typ SOKKIA[®] Set 600 mit Prismenspiegel und elektronischem Feldbuch SDR 33 zur Datenspeicherung. An einer Stichprobe von je nach Höhenvarianz 10-20 Kiefern und 20-30 Eichen wurden mit laserbasierten Geräten (wie dem LEM 50 von JENOPTIK) auf Stativ die Baumhöhe sowie die Höhe des Kronenansatzes (definiert als erster zur Krone gehörender Grünast) am Stamm bestimmt. Auf den Kernflächen und ausgewählten Zusatzflächen erfolgte außerdem an den Höhenmessbäumen die Erhebung der Kronenradien nach der Dachlot-Methode (RÖHLE &

HUBER 1985), für Trauben-Eichen in acht, für Kiefern in vier Richtungen in regelmäßigen Winkeldistanzen¹. Als zweifache mittlere Kronenradien wurden daraus Kronenbreiten und auf deren Basis waagerechte Kronenschirmflächen berechnet. Aus der Division der Kronenschirmflächen durch die Stammkreisfläche auf 1,3 m Höhe ergeben sich "relative Kronenschirmflächen" als Möglichkeit, Effekte der Kronengröße auf die Vitalität (SPIECKER 1991; EISENHAUER 2010) auch unabhängig vom Einfluss des BHD zu untersuchen.

Alle Bäume auf den Flächen der Klimasequenz wurden dauerhaft auf geröteten Rindenstellen mit Tubenfarbe nummeriert. Auf den Zusatzflächen erfolgte eine solche Kennzeichnung nur an zwei bis drei markanten Bäumen, um bei Bedarf mit einer Stammsfußkarte die Baumpositionen rekonstruieren zu können, das Waldbild aber nicht mehr als nötig zu stören. Zur Aufbereitung der Messwerte zu flächenbezogenen Daten, für grafische Darstellungen und die Berechnung von Strukturparametern wurde das Analyse- und Simulationsprogramm *BWINPro-S* genutzt (Version 6.3; SCHRÖDER et al. 2007b).

Für die *dendroökologischen* Untersuchungen auf Basis von Jahrringparametern ist im Kontext dieser Arbeit aus der Vielfalt verschiedener Methoden und Analyseverfahren nur eine kleine Auswahl relevant, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Im Mittelpunkt der Methodenwahl standen Ansätze, die

- a) sich an einer großen Zahl von Stichproben mit möglichst geringen Ansprüchen an Messtechnik und Arbeitszeit durchführen lassen,
- b) vor allem die kurzweiligen Schwankungen der Jahrringbreiten wiedergeben (interannuelle Differenzen) und den Einfluss langfristiger Alterstrends sowie autokorrelative Effekte auf die Jahreswerte minimieren,
- c) möglichst deutliche und biologisch interpretierbare Rückschlüsse erlauben auf die Art und Stärke der Beziehungen zwischen der Jahrringbreite und Witterungseinflüssen der vergangenen 50 bis 60 Jahre (seit 1951), für die Messreihen der Tageswerte von Temperatur und Niederschlag vorliegen.

Auf Grund von Unterpunkt a) empfehlen sich zum Beispiel röntgendensitometrische Verfahren, die die Auswertung von Dichteparametern erlaubt hätten, nicht für die Anwendung im gegebenen Rahmen. Basis der zu wählenden Auswertungsmethodik sind stattdessen umfangreiche Messreihen der Jahrringbreite, die zwar Aufschluss über die jährlich erreichten Radialzuwächse geben, intraannuell aber nicht weiter untergliedert sind. Nach Unterpunkt b) sollte die zu wählende Methodik plausible und nachvollziehbare Verfahren zur Datenaufbereitung (*pre-whitening*) enthalten (siehe 2.3.3). Mit dem Ziel möglichst umfassender Auswertung der erhobenen Daten wird außerdem der in Abb. 2-12 rechts dargestellte Weg gewählt, nach dem Trendbereinigung und Autokorrelationsreduktion für jeden Probebaum einzeln erfolgen.

¹ Aus den Positionen, dem BHD, der Höhe und den Kronenmaßen wurden Konkurrenzindizes (BIGING & DOBBERTIN 1995; MÜNDER 2005) berechnet, die für alle Bäume vorliegen. Sie sind in die Parametrisierung eines Wachstumsmodells für Eichen-Kiefern-Mischbestände eingegangen, das für diese Arbeit jedoch ohne Bedeutung ist und deshalb nicht näher behandelt wird.

Im Sinne der Transparenz und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse werden die Rohdaten mit nachvollziehbaren, standardisierten Verfahren verarbeitet, die im Folgenden dokumentiert sind. Zum Teil sind dies mit Hilfe von Tabellenkalkulation (Microsoft Excel) oder Statistiksoftware (R) durchzuführende Schritte, zum anderen wird auf die Software-Pakete CLIMTREG (BECK et al. 2013) und `bootRes` (ZANG 2009, ZANG & BIONDI 2012) zurückgegriffen. Gerade CLIMTREG erlaubt eine effiziente Bündelung aufwendiger Arbeiten bei den dendroökologischen Analysen und kommt sowohl dort als auch bei der Datenaufbereitung mehrfach zum Einsatz¹. Da es bisher kaum in Publikationen beschrieben oder dokumentiert angewandt wurde, erläutert der Abschnitt 3.4.2 deshalb seinen theoretischen Ansatz und seine Wirkungsweise eingehender. Zuvor erfolgt die Beschreibung der methodischen Schritte, die nötig sind, um die Eingangsdaten zu generieren und die Witterungswirkungen auf den Zuwachs auf den verschiedenen Skalenebenen zu analysieren.

3.3.1 Probenahme von Bohrkernen und Datenaufbereitung

- *Baumauswahl* -

Die Auswahl der Probebäume orientierte sich an dem Ziel, sowohl den laufenden Radialzuwachs einer Stichprobe aus den Untersuchungsbeständen zu bestimmen als auch die langfristige Zuwachsentwicklung repräsentativ für die Baumarten zu rekonstruieren². Parallel waren die zur Quantifizierung der Konkurrenzsituation notwendigen Informationen zu erheben. Zur Beprobung wurden auf den Flächen K1-K5 je 40 Eichen und 20 Kiefern ausgewählt. Auf den neu angelegten Zusatzflächen betraf dies jeweils 20 Eichen und 10 Kiefern³. Die ausgewählten Bäume gehören ungefähr zur Hälfte dem herrschenden Bestand an, also den Baumklassen 1 und 2. Dieses Teilkollektiv dient vorrangig der vergleichenden Analyse der langfristigen, durch Konkurrenz möglichst ungestörten Wachstumsabläufe der Trauben-Eiche. Die zweite Hälfte setzt sich aus Bäumen aller Baumklassen bis auf die nicht beprobte Klasse 5 zusammen, die in möglichst direkter Nachbarschaft in Mischung von Eichen und Kiefern stehen. Sie diente vorrangig der Quantifizierung der Konkurrenzwirkungen auf den Einzelbaumzuwachs. Wo es möglich war, wurden zur Bohrkernentnahme Bäume bevorzugt, an denen auch Probenahmen bzw. Beobachtungen für andere Teilziele der Projekte OakChain und INKA BB (ELMER et al. 2009; GUERICKE et al. 2010) erfolgt waren, zum Beispiel Blattproben für Analysen des Nährelementgehalts oder Klassifizierungen der Schaftqualität (Abb. 3-18; BÄUCKER et al. 2007)).

¹ Auch für die Statistik-Software "R" gibt es Pakete, die speziell für dendroökologische Auswertungen geschrieben wurden. Auf Grund fehlender Einarbeitungszeit wurde hier mit Ausnahme von "`bootRes`" nicht darauf zurückgegriffen.

² Die genannten Kriterien für die Probebaumauswahl resultieren vor allem aus der Einbindung der Arbeit in die Projekte "OakChain" und "INKA BB" (siehe weiter unten). Bohrkernanalysen dienten in deren Rahmen auch anderen Aufgaben wie der Wachstumsmodellierung, die über die hier vorgestellten Gebiete hinausgingen.

³ Bei der Festlegung der Probebaumzahl spielten Kapazitätsüberlegungen ebenfalls eine Rolle. Für das Bohren, Präparieren, Schleifen, Messen, Korrigieren und Auswerten eines Bohrkerns sind insgesamt etwa 45 Minuten zu veranschlagen. Bei rund 1800 analysierten Bohrkernen ergibt das einen Zeitaufwand von 1350 Stunden bzw. rund 170 Arbeitstagen.

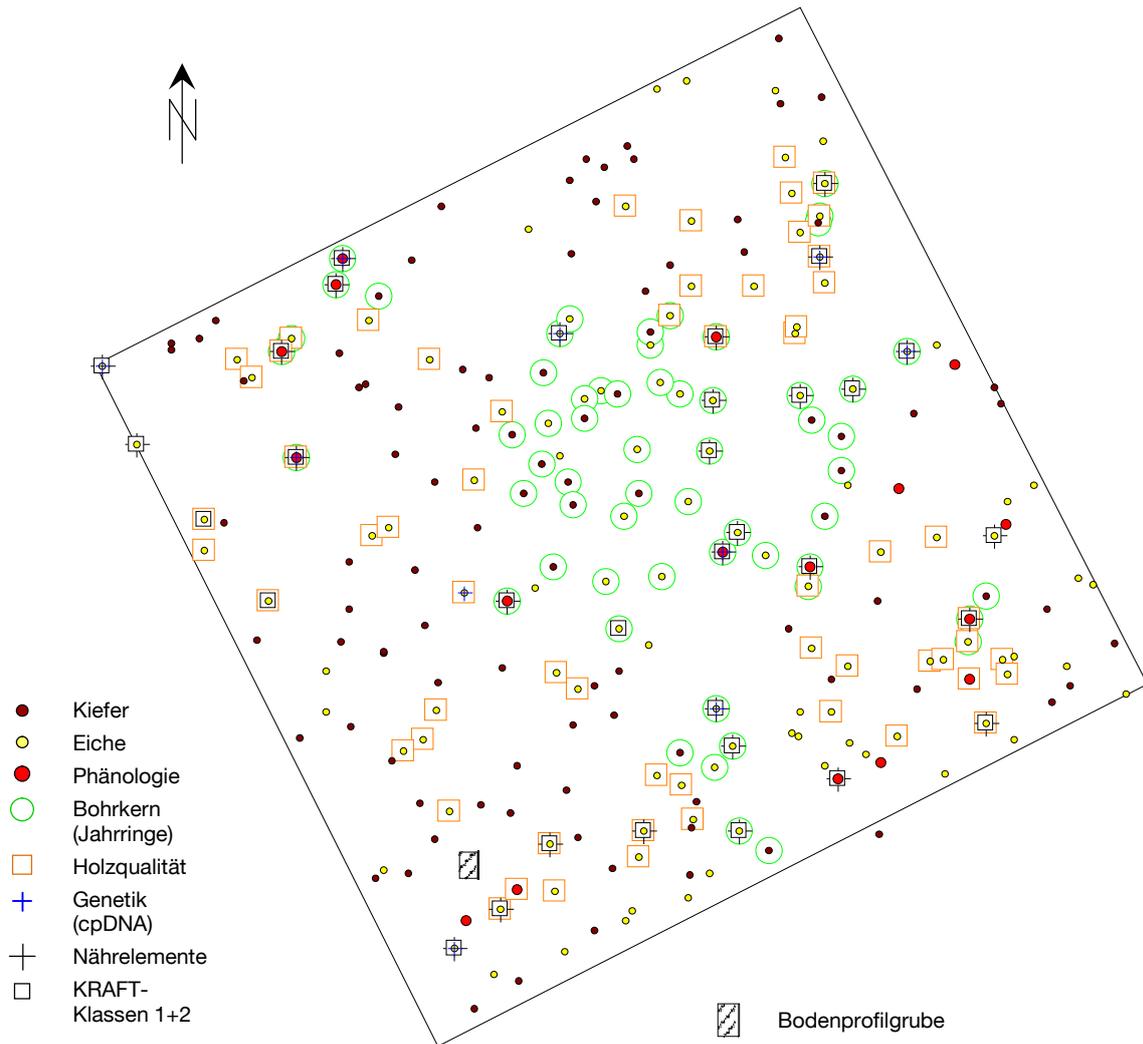


Abb. 3-18: Beispiel für die Organisation der Probenahme von Bohrkernen auf den Versuchsfeldern als Teil der integrativen Versuchsfeldarbeit in den Projekten OakChain und INKA BB, Versuchsfeld K2

- Bohrkernentnahme -

Jedem beprobten Baum wurden auf 1,3 m stammparalleler Entfernung vom Boden zwei Kerne entnommen. Abweichungen von dieser Entnahmehöhe waren bei einigen Probebäumen wegen Unregelmäßigkeiten im Stammverlauf nötig und wurden dokumentiert. Mit einem Spezialmaßband erfolgte vor der Entnahme die Messung des Brusthöhendurchmessers mit Rinde als Bezug für die Standardisierung der Jahrringbreiten (siehe unten). Die Erhebung dieses Maßes macht auch bei abweichender Entnahmehöhe den Bezug aller angegebenen Jahrringbreiten bzw. Radialzuwächse auf die forstlich übliche Brusthöhe (1,3 m) möglich. Zum Bohren kam ein speziell für die Verwendung in Hartholz gefertigter, manuell geführter Preßler'scher Zuwachsbohrer der Firma "Suunto" mit einem Innendurchmesser von 5 mm und einer Länge von 400 mm zum Einsatz.

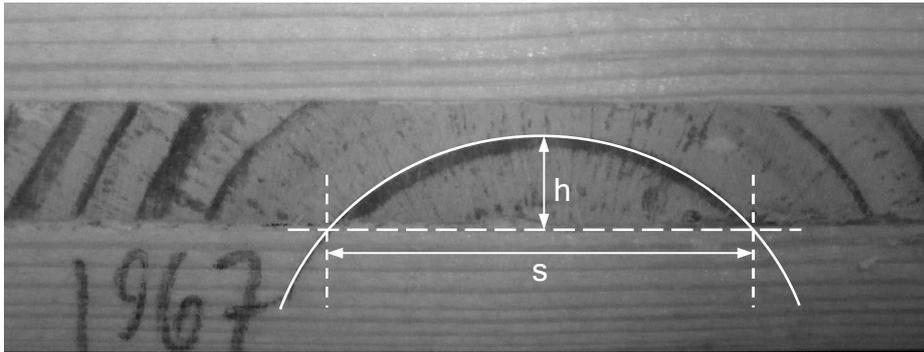
Die Wahl der Entnahmerichtung folgte dem Grundsatz, nur ungestörte, repräsentative Abschnitte des Stammumfangs möglichst auf 1,3 m und in rechtem Winkel zueinander zu beproben. Äste bzw. Astnarben, Nekrosen, Kehlen, starke Reaktionsholzbildungen, Frostrisse, Krümmungen und andere Unregelmäßigkeiten führten zu einer Verlegung der Bohrrichtung. Um das Alter und die langfristige Entwicklung möglichst weit zurückzuverfolgen, erfassen bei Bäumen der herrschenden Bestandesschicht in der Regel beide Kerne die Jahrringe vom Kambium bis zur Markröhre. Den übrigen Bäumen wurden jeweils ein Kern bis zur Markröhre und ein kürzerer Kern über die letzten 20-40 Jahre entnommen, um das Alter schätzen sowie für die Zuwachswerte der jüngsten Vergangenheit Mittelwerte über zwei Kerne bilden zu können. Zur Erleichterung von Wundverschluss und Überwallung wurden die Bohrlöcher mit Holzdübeln und künstlicher Rinde (LacBalsam®) verschlossen. Die Außenarbeiten fanden in der Vegetationsruhe jeweils in den Monaten November bis März der Jahre 2007 bis 2009 statt.

- Aufbereitung der Bohrkerninformationen -

Die Bohrkernkerne wurden nach Entnahme mindestens eine Woche fixiert getrocknet und danach auf beschriftete Trägerleisten (Fläche, Baumnummer und Entnahmerichtung) geleimt. Anschließend erfolgte mehrmaliges Schleifen mit abnehmender Korngröße. Zur Erfassung der Rohdaten diente ein LINTAB-5-Messtisch mit ZEISS-Binokular sowie die Software TSAPWIN Version 0.53 (Rinntech GmbH, Heidelberg). Direkt gemessen wurden die Früh- und Spätholzbreiten, die Jahrringbreite (JRB) ergab sich im Zuge der Weiterverarbeitung als Summe dieser beiden Größen (siehe unten). Bereits in TSAPWIN erfolgte anhand zweifelsfrei messbarer Referenzkerne die optische Synchronisierung der jeweils zwei Kerne pro Baum sowie der einzelnen Bäume zu Mittelkurven je Baum beziehungsweise je Bestand. Neben den JRB wurden an jedem Kern, der bis zur Markröhre reichen sollte, diese aber verfehlt hatte, Sehnenlänge und Höhe des Kreisbogens erfasst, den der letzte messbare Jahrring nach innen bildet (Abb. 3-19)¹. Aus diesen Größen lässt sich der zwischen Ende der Messung und Stammmitte verbleibende Restradius ermitteln, der zur Standardisierung² der JRB notwendig ist (Formel 3-2).

¹ Im Durchschnitt konnte – je nach Alter und BHD der Bäume – nur bei etwa 25-30 % der entsprechenden Bohrungen die Markröhre getroffen werden, für die verbleibende Mehrheit war deshalb die beschriebene Methode zur Herleitung des fehlenden Innendurchmessers notwendig.

² Verschiedene Autoren verwenden den Begriff der Standardisierung für das "pre-whitening" bzw. die Arbeitsschritte zur Erstellung von Index-Zeitreihen aus Messdaten. Hier wird dafür der Begriff "Indexbildung" benutzt; "Standardisierung" bezeichnet den Bezug gemessener Jahrringbreiten auf den BHD ohne Rinde.



$$r_{rest} = \frac{4 \cdot h^2 + s^2}{8 \cdot h}$$

(Formel 3-2)

Abb. 3-19: Berechnung des Restradius von Bohrkernen zur Standardisierung der Jahrringbreiten

Eine weitere Eingangsgröße ist der BHD ohne Rinde als Durchmesser eines idealisierten Stammquerschnitts in Kreisform. Er wird aus dem per Umfangmessband ermittelten Durchmesser mit Rinde durch Abzug der doppelten Rindenstärke berechnet, die mit geeigneten Algorithmen (zum Beispiel ALTHERR 1975 für Eiche) herzuleiten ist. Nach Abschluss der Standardisierung ist die doppelte Summe der korrigierten JRB, evtl. zuzüglich des doppelten korrigierten Restradius, gleich dem BHD ohne Rinde. Die einzelnen Schritte dieses Prozesses fasst Abb. 3-20 zusammen.

1. Messen der Jahrringbreiten an zwei Kernen i.d.R. um 90° versetzt
2. Bestimmung des nicht gemessenen Innenradius (Restradius " r_{rest} " bei exzentrischen Kernen, vgl. Abb. 3-19) ggf. für beide Kerne getrennt. Wurde die Markröhre getroffen bzw. bis dort gemessen, ist $r_{rest} = 0$.
3. Für beide Kerne getrennt wird je ein Korrekturfaktor KF_1 ermittelt (n = Anzahl der gemessenen Jahrringe)

$$KF_1 = \frac{(BHD_{o.R.})/2}{\sum_{i=1}^n JRB_i + r_{rest}}$$
4. Korrektur der Kerne jeweils durch Multiplikation der Jahrringbreiten mit dem Korrekturfaktor KF_1 .

$$\sum_{i=1}^n (JRB_i \cdot KF_1) + r_{rest} \cdot KF_1 = (BHD_{o.R.})/2$$
5. Abschließend wird das arithmetische Mittel der korrigierten Kerne gebildet ($JRBq_i = [JRB_{k_{Kern1}} + JRB_{k_{Kern2}}]/2$) mit $JRBk_i$ = korrigierte Jahrringbreite in Himmelsrichtung des Kerns 1 (oder 2). Sind nahe der Markröhre nur noch für einen Kern Meßwerte vorhanden, so werden diese (ohne Mittelung) als $JRBq_i$ genutzt, bis der (kleinere) korrigierte Restradius oder die Markröhre erreicht ist.
6. Ein zweiter Korrekturfaktor wird berechnet, damit die Summe der mittleren Jahrringbreiten einschließlich des Restradius dem ideellen BHD ohne Rinde entspricht:

$$KF_2 = \frac{(BHD_{o.R.})/2}{\left(\sum_{i=1}^n JRBq_i\right) + r_{rest}}$$
7. Korrektur der mittleren JRB und ggf. von r_{rest} mit dem Faktor KF_2 , so dass gilt:

$$\sum_{i=1}^n (JRBq_i \cdot KF_2) + r_{rest} \cdot KF_2 = (BHD_{o.R.})/2$$

Abb. 3-20: Vorgehen zur Erzeugung standardisierter Einzelbaum-Zeitreihen aus Bohrkern-Jahrringmessreihen.

Zur automatisierten Erzeugung gemittelter und standardisierter Zeitreihen der JRB im *EXCEL*-Format aus den *TSAPWIN*-Ausgangsdateien im sogenannten "Heidelberger Format" (*.fh)¹ und den kernbezogenen Zusatzinformationen wurde das Programm *RING* geschrieben. *RING* erstellt zusätzlich flächenbezogene Listen der verarbeiteten Kerne mit den Radial- und Grundflächenzuwachsdaten, der Anzahl der Splint-Jahrringe bei Eiche und der Stammklasse. Über eine SQL-Datenbank sind die Bohrkerninformationen mit den anderen erhobenen Baumparametern verknüpft.

- Chronologien und Indexbildung -

Unter Chronologie wird nach FRITTS (1976, siehe Abschnitt 2.3.3) im gegebenen Zusammenhang eine baumartspezifische Zeitreihe verstanden, die repräsentativ für eine Versuchsfläche bzw. einen Bestand ist. Sie wird durch Mittelwertbildung aus einer ausreichenden Anzahl von Bäumen einer Art mit für den Bestand typischem Wachstumsverlauf hergeleitet (BONN 1998, NEUMANN 2001). Die Konzentration auf den Mittelwert einer repräsentativen Stichprobe soll den zufälligen Anteil an der Jahrringbildung reduzieren. Die Varianz zwischen den Probebäumen infolge individuell unterschiedlicher Konkurrenzeffekte lässt sich einerseits dadurch minimieren, dass die zugrundegelegte Stichprobe nur vorherrschende bis herrschende Bäume einbezieht. Andererseits kann man aus den Bohrkernproben diejenigen Bäume ausschließen, deren Wachstum auffällig vom mittleren Verlauf des Bestandes abweicht. Die notwendige Prüfung derartiger Abweichungen orientiert sich an dem Vorgehen, das BECK (2007) vorschlägt: Aus den standardisierten Jahrringbreiten wird baumindividuell die relative kumulative Entwicklung des BHD abgeleitet und für alle Proben des Bestandes je Baumart dargestellt. Kurvenverläufe weit außerhalb der doppelten Standardabweichung² der Stichprobe sowie mit phasenweise abweichenden Steigungen sind dann aus der Mittelwertbildung beziehungsweise aus dem Kollektiv, das man anschließend zur Chronologiebildung heranziehen möchte, auszuschließen. Ein Beispiel für diese optische Ausreißerprüfung auf Basis des Wuchsverhaltens gibt Abb. 3-21 für die beprobten Eichen der Baumklassen 3 und 4 auf der Klimasequenzfläche K2.

¹ Das "Heidelberger Format" ist das Standard-Ausgabeformat der in Heidelberg hergestellten LINTAB-Mess-tische der Firma "Rinntech". Es handelt sich um Textdateien, die sowohl mit der TSAPWin-Software von Rinntech als auch mit Standard-Office-Programmen verarbeitet werden können.

² Die Standardabweichung wird einmalig zu Beginn des Auswahlvorgangs berechnet, also noch unter Einbeziehung der möglicherweise aus der Stichprobe auszuschließenden Bäume.

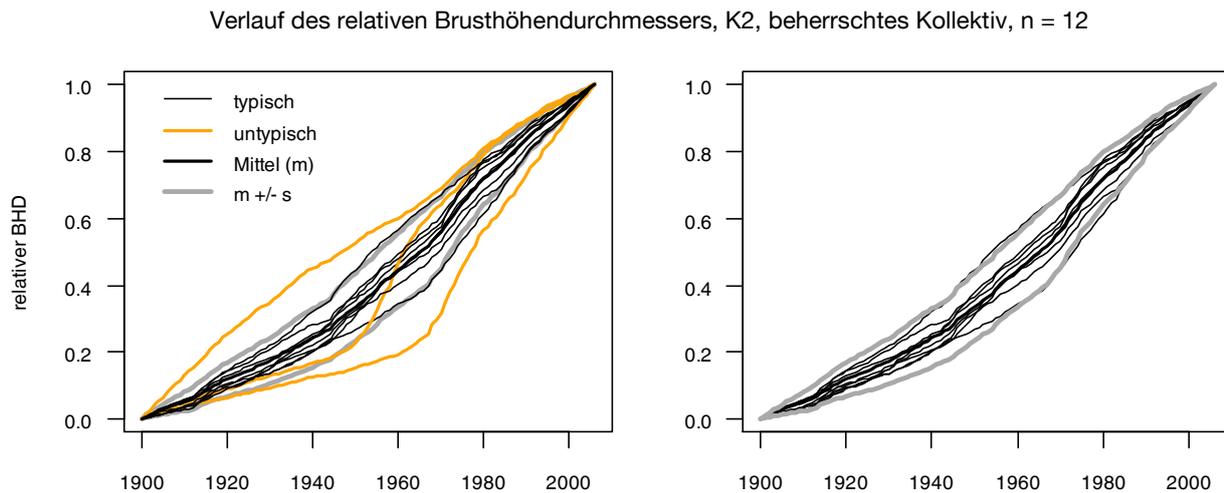


Abb. 3-21: Datenbereinigung ("Ausreißerprüfung") zur Bildung bestandes- und baumartenspezifisch repräsentativer Stichproben anhand der Entwicklung des relativen BHD (m = Mittelwert, s = Standardabweichung). Bäume, deren Durchmesserwachstum deutlich vom Mittelverlauf abweicht oder weit außerhalb der Standardabweichung liegt, sind links orange hervorgehoben und werden nicht weiter berücksichtigt; es verbleiben nur die Bäume mit "typischem" Verlauf (rechts). Beispiel: Eiche mit einem mittleren Alter von etwa 125 Jahren (Fläche K2, beherrschtes Kollektiv).

Nach der Eingrenzung der Stichprobe auf die repräsentativen Bäume erfolgten die weiteren Schritte des *pre-whitening* für jeden Baum separat im Programm CLIMTREG (3.4.2; BECK et al. 2013). Als erstes sind störende Trends zu eliminieren. Dabei geht es nicht nur um langwellige Alterstrends, sondern mit Blick auf ein möglichst rauscharmes Witterungssignal auch um die mittelfristigen Einflüsse von Bewirtschaftungsmaßnahmen oder zufälligen Störungen. Die Erstellung eines dafür nötigen Referenzverlaufs stützt sich im hier gewählten Ansatz auf den Verlauf des Brusthöhendurchmessers in Abhängigkeit von der Zeit. An diesen Verlauf wird eine kubische Spline-Funktion mit einer variablen Anzahl von Knoten angepasst (COOK & PETERS 1981, Abb. 3-22)¹. CLIMTREG bietet dazu vier Vorschläge für *Spline*-Funktionen mit zunehmender Knotenanzahl an, aus denen man vor allem auf Basis von zwei Kriterien auswählt: Die Knotenanzahl soll so gering wie möglich sein, und innerhalb der resultierenden Index-Zeitreihe sollte keine signifikante Autokorrelation ersten Grades mehr bestehen. Aus den jährlichen Differenzen zwischen den Werten der gewählten Funktion ergeben sich modellierte Jahrringbreiten (JRB_p), die nun den tatsächlich gemessenen (und standardisierten) gegenübergestellt werden (JRB_o , Abb. 3-22 links unten). Die Division JRB_o/JRB_p ergibt die erste Jahrringindex-Zeitreihe JRI_1 , die trendfrei sein und einen Mittelwert von 1 haben sollte (Abb. 3-23 links). Sollte nach der Trendeliminierung doch noch eine signifikante Autokorrelation erster Ordnung bestehen, so wird sie vom Programm durch autoregressive Modellierung beseitigt, das heißt mit Hilfe einer Division des JRI_1 durch die Funktionswerte eines linearen Modells mit den Vorjahreswerten als unab-

¹ Die Spannweite der vom Programm vorgeschlagen Knotenanzahl ergibt sich aus der Länge der Zeitreihe.

hängiger Größe (Abb. 3-23). Man erhält autokorrelationsfreie, "endgültige" Indexwerte JRI_2 (Formel 3-3 und Abb. 3-23 rechts).

$$JRI_{2(t)} = JRB_{1(t)} / (a_0 + a_1 \cdot JRB_{1(t-1)}) \quad \text{Formel 3-3}$$

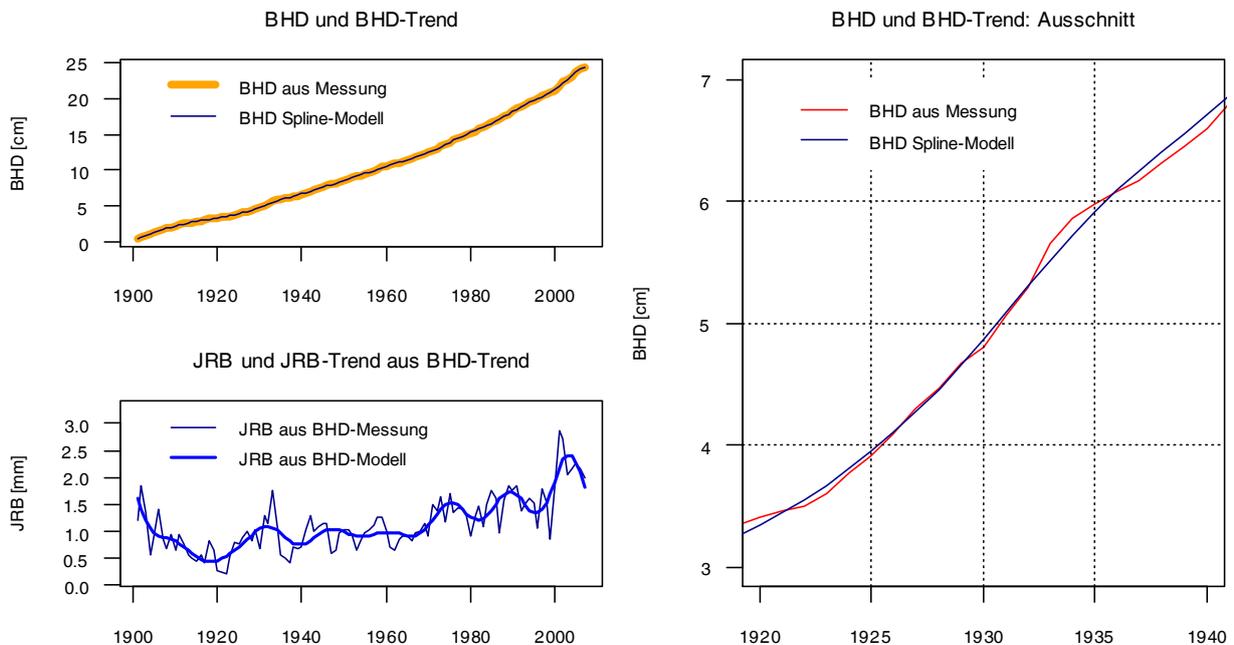


Abb. 3-22: Ablauf der Datenaufbereitung (*pre-whitening*) am Beispiel des Probebaumes Nr. 98 der Versuchsfläche "K4" (Trauben-Eiche). Oben links: Entwicklung des BHD ohne Rinde über der Zeit, rekonstruiert aus den mittleren gemessenen und standardisierten Jahringbreiten gegebenenfalls zuzüglich des Restradius, und Verlauf der daran angepassten kubischen Spline-Funktion mit 14 Knoten. Unten links: Reale mittlere Jahringbreiten (JRB) im Vergleich mit den aus Differenzierung der Spline-Funktion entstehenden modellierten JRB. Rechts: Vergrößerter Ausschnitt aus der Darstellung oben links zur Verdeutlichung des Vorgehens.

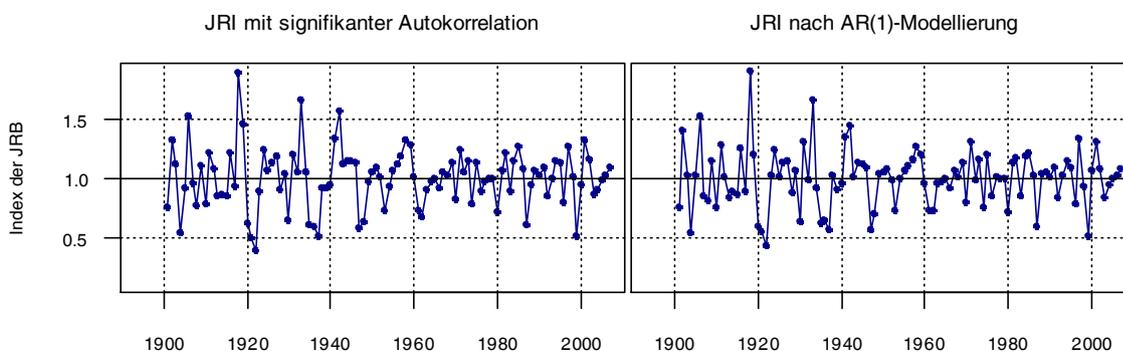


Abb. 3-23: Autoregressive (AR(1)) Modellierung als zweiter Schritt der baumindividuellen Indexbildung bei Vorhandensein signifikanter Autokorrelation ersten Grades nach Entfernen des Alterstrends nach Abb. 3-22 am Beispiel des Probebaumes Nr. 98 ("K4"). Links: Aus der Trendbereinigung entstandener Jahringindex (JRI_1) über der Zeit, rechts: Jahringindex-Zeitreihe nach AR(1)-Modellierung (JRI_2 ; vergleiche Formel 3-3).

Die weiter zu verwendende Standort- beziehungsweise Bestandeschronologie ergibt sich im gewählten Verfahren schließlich aus der Zeitreihe der arithmetischen Mittel der baumindividuellen JRI_2 -Werte. Letztere bilden außerdem die Basis zur Berechnung weiterer Parameter, zum Beispiel zur Beurteilung der Stärke des Witterungssignals oder zur Einschätzung der durchschnittlichen Variabilität zwischen den einzelnen Bäumen.

3.3.2 Parameter zur Beurteilung der Zeitreihen

Für den Informationsgehalt der flächenbezogenen Chronologien auf Basis der Jahrringbreiten-Zeitreihen sind sowohl die Stärke als auch die Homogenität der von Baum zu Baum wiederkehrenden Reaktionsmuster von Bedeutung (siehe 2.3.1). Ein grundlegendes Maß für die Einheitlichkeit beziehungsweise Ähnlichkeit der untersuchten Stichproben ist der einfache Korrelationskoeffizient r nach PEARSON (FRITTS 1976). Er wird zuerst paarweise für alle Zeitreihen einer Stichprobe berechnet und dann arithmetisch gemittelt, um beurteilen zu können, wie vergleichbar die individuellen Zuwachsvariationen sind. Nach SCHWEINGRUBER (1983) ist der Mittelwert über alle Zeitreihen ein für den betrachteten Standort charakteristisches Homogenitätsmaß. Die Berechnung gleitender Mittelwerte erlaubt zusätzlich Aufschlüsse über Veränderungen der Einheitlichkeit im Zeitablauf.

Die Repräsentativität der zur Bohrkernentnahme ausgewählten Stichprobe für die Grundgesamtheit beziehungsweise den Bestand wird anhand des Parameters "*Expressed Population Signal*" (*EPS*) beurteilt. Nach BRIFFA & JONES (1990) kann das EPS definiert werden als Verhältnis zwischen der Signalstärke und der Gesamtvarianz der Chronologie¹. Es ist abhängig vom Stichprobenumfang sowie von den Korrelationen zwischen den Jahrringindex-Zeitreihen der Einzelbäume (Formel 3-4):

$$EPS = \frac{n \cdot r_m}{n \cdot r_m + (1 - r_m)} \quad \text{Formel 3-4}$$

Mit n = Stichprobenumfang (Anzahl beprobter Bäume), r_m = mittlerer Korrelationskoeffizient zwischen den Einzelbaum-Indexreihen, Formel nach NEUMANN (2001)

Im Bereich weniger Bäume ist das EPS stark von der mittleren Korrelation zwischen den Einzelchronologien, zusätzlich aber auch vom Stichprobenumfang abhängig; bei einer Probebaumzahl von mehr als 10 Bäumen nimmt die Bedeutung dieses Faktors jedoch deutlich ab. Nach WIGLEY et al. (1984, zitiert in NEUMANN 2001) gelten EPS-Werte von mehr als 0,85 als hinreichend, um eine akzeptable statistische Qualität, das heißt Repräsentativität, anzuzeigen. BRIFFA & JONES (1990) weisen darauf hin, dass sich das EPS über die Zeit verändern kann, wenn man dynamische Berechnungen der Korrelationskoeffizienten berücksichtigt. Neben dem EPS für den gesamten von Bohrkernen abgedeckten Zeitraum werden

¹ "[The EPS] ... quantifies the degree to which this particular sample chronology portrays the hypothetical perfect chronology." (BRIFFA & JONES 1990)

deshalb für die Kollektive der Klimasequenzflächen auch die Werte für die Zeiträume bis 1950 und ab 1951 gesondert berechnet. Damit sollen mögliche Unterschiede in der Einheitlichkeit zwischen Stichproben und Grundgesamtheit in verschiedenen Zeit- und vor allem Altersabschnitten aufgedeckt werden.

Die Einheitlichkeit der Jahrringindex-Chronologien für die Klimasequenzflächen soll zusätzlich zum EPS auch durch die "Gleichläufigkeit" (GLK) dargestellt werden. Sie ist nach SCHWEINGRUBER (1983) ein Vergleichsmaß von zwei Zeitreihen, zum Beispiel a und b . Zur Berechnung der GLK werden als erstes zu jeder Zeitreihe Differenzreihen (zum Beispiel $\Delta_{a,i} = a_i - a_{i-1}$) für alle Zeitpunkte i mit Ausnahme des ersten Jahres gebildet, die die Veränderungen zwischen aufeinanderfolgenden Zeitpunkten abbilden. Von diesen Differenzreihen werden in Form einer Hilfsvariablen $G_{a,i}$ nur die Vorzeichen weiterverwendet (Formel 3-5):

$$G_{a,i} = \begin{cases} 0,5 & \text{falls } \Delta_{a,i} > 0 \\ 0 & \text{falls } \Delta_{a,i} = 0 \\ -0,5 & \text{falls } \Delta_{a,i} < 0 \end{cases} \quad \text{Formel 3-5 (Erläuterungen im Text)}$$

Gleichläufigkeit wird bei Zeitreihenanalysen in der Regel als Durchschnittswert der absoluten Beträge über eine längere Zeitspanne von n Jahren ermittelt und gibt dann den Anteil (meist in Prozent ausgedrückt) der Jahre an der Gesamtlänge der Periode wieder, in dem Richtungsgleichheit bei der Veränderung vom aktuellen Jahr zum Folgejahr herrscht. Formel 3-6 (oben) zeigt die Berechnungsweise am Beispiel der beiden Zeitreihen a und b . Bei völliger Parallelität ist $GLK = 1$, Werte gegen Null entstehen bei Gegenläufigkeit der betrachteten Reihen. Unabhängigkeit zwischen a und b verursacht GLK -Werte um 0,5. Nach GRIESER (1997) wird zur Analyse der Stichproben die paarweise Berechnung nach Formel 3-6 (links) auf m Zeitreihen erweitert und zu diesem Zweck in Formel 3-5 der Parameter $\pm 0,5$ ($= 1 \cdot 2^{-1}$) durch $\pm 1 \cdot m^{-1}$ ersetzt (Formel 3-6 unten).

$$GLK(a,b) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} |G_{a,i} + G_{b,i}| \quad \text{Formel 3-6 (Erläuterungen im Text)}$$

$$GLK(a,b,\dots,m) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \left| \sum_{k=1}^m G_{a_k,i} \right|$$

Die Gleichläufigkeit nach Formel 3-6 wird im Folgenden angewandt, um Aussagen über die Parallelität der Jahrringindex-Zeitreihen in den Bohrkern-Stichproben verschiedener Versuchsbestände zu treffen. Zusätzlich soll aber auch festgestellt werden, in welche Richtung und in welcher Einheitlichkeit gleichläufige Reaktionen der Einzelzeitreihen vorliegen. Dazu eignet sich nach SCHWEINGRUBER (1983) und GRIESER (1997) der "Intervalltrend", der sich ähnlich wie die GLK berechnet. Bei der Anwendung auf m Zeitreihen werden als Aus-

gangspunkt wieder Differenzreihen für alle Reihen a_j mit $j=1,\dots,m$ berechnet mit $\Delta_{j,i} = a_{j,i} - a_{j,i-1}$. Daraus folgt der jährliche Intervalltrend $t_{j,i}$ der Reihe a_j mit (Formel 3-7):

$$t_{j,i} = \begin{cases} 1,0 & \text{falls } \Delta_{j,i} > 0 \\ 0,5 & \text{falls } \Delta_{j,i} = 0 \\ 0,0 & \text{falls } \Delta_{j,i} < 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Formel 3-7} \\ \text{(Erläuterungen im Text)} \end{array}$$

Bildet man nun den Mittelwert von $t_{j,i}$ über alle untersuchten Zeitreihen m , so erhält man den mittleren Intervalltrend t_i in Abhängigkeit von der Zeit (Formel 3-8):

$$t_i = \frac{\left(\sum_{j=1}^m t_{j,i} \right)}{m} \quad \begin{array}{l} \text{Formel 3-8} \\ \text{(Erläuterungen im Text)} \end{array}$$

Wie der Einzelwert, so bewegt sich auch der mittlere Intervalltrend im Bereich zwischen Null und Eins. Seine Ergebnisse lassen sich zur Festlegung von Weiserjahren nutzen: Bei parallelem Anstieg zwischen Vorjahr und aktuellem Jahr bei einer hohen Zahl von Bäumen steigt der Intervalltrend gegen Eins, bei homogenem Rückgang sinkt er gegen Null. Werte um 0,5 zeigen ein diffuses und unabhängiges Verhalten der Stichprobenelemente (GRIESER 1997). Die Bildung von Mittelwerten über längere Zeitperioden hat bei diesem Parameter wenig Aussagekraft, denn die Abweichungen nach unten und oben sollten in den Jahrringindexkurven so ausgeglichen vorhanden sein, dass sich immer Mittelwerte um 0,5 ergeben.

Während Gleichläufigkeit und Intervalltrend für die *Jahrringindex*-Zeitreihen berechnet werden, bezieht sich die Untersuchung der Wachstumsreaktionen auf äußere Einflüsse mit Hilfe der Parameter "Autokorrelation" und "Sensitivität" auf die Zeitreihen der *Jahrringbreite*, das heißt vor der Eliminierung der Vorjahreswirkungen im Zuge der Indexbildung (vergleiche 2.3.3 und 3.3.1). Um Veränderungen dieser Parameter im Zeitablauf festzustellen, werden zusätzlich zu den Angaben für den gesamten von Bohrkernanalysen erfassten Analysezeitraum Mittelwerte über ein gleitendes Intervall von 21 Jahren Länge berechnet und ausgewertet¹. Der Begriff Autokorrelation bezeichnet die Beziehung zwischen der aktuellen Jahrringbreite und der eines vergangenen Jahres. Die Autokorrelation "erster Ordnung" (*AK1*, statistischer Zusammenhang zwischen Jahreswert und Vorjahreswert) ist als Spezialfall im Folgenden von besonderem Interesse. Das entsprechende lineare Modell lässt sich bezogen auf die Analyse von Jahrringbreiten wie folgt beschreiben (Formel 3-9):

$$JRB_t = \alpha \cdot JRB_{t-1} + Z_t \quad \text{Formel 3-9}$$

Mit *JRB* = Jahrringbreite; t = aktuelles Jahr; α = Koeffizient; Z = Zufallsterm

¹ Die Zahl von 21 Jahren wird benutzt, um die Schwelle von $n = 20$ zu überschreiten, oberhalb derer sich zum Beispiel der t-Wert aus der Verteilung nach STUDENT (CRAWLEY 2007) kaum noch verändert. Die ungerade Zahl 21 ermöglicht außerdem die grafische Darstellung periodenbezogener Werte über dem mittleren Jahr 11.

Der Zufallsterm Z kann auch als "weißes Rauschen" bezeichnet werden, seine Werte sind seriell voneinander unabhängig und schwanken um einen Mittelwert von null.

Die Sensitivität S ergibt sich nach Formel 3-10 aus der Differenz zwischen dem Wert einer Zeitreihe (zum Beispiel Jahrringbreite oder Jahrringindex) und dem Wert desselben Parameters im Vorjahr, ins Verhältnis gesetzt zur Summe der beiden Größen (SCHWEINGRUBER 1983; BECK 2007).

$$S_{i+1} = 2 \cdot \frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1} + x_i} \quad \text{Formel 3-10}$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=2}^n |S_i|}{n-1}$$

mit x_i = Vorjahreswert, x_{i+1} = aktueller Jahreswert, n = Anzahl der Jahre zur Mittelbildung

Die mittlere Sensitivität wird zum einen über den gesamten Untersuchungszeitraum beziehungsweise die Jahre seit 1900 ($n = 107$) berechnet, zum anderem über die oben genannten gleitenden Intervalle von $n = 21$ Jahren.

3.3.3 Weiserjahre

Die Definition von Weiserjahren in dieser Arbeit folgt der Annahme, dass eine starre Vorgabe von Schwellenwerten für die Zuwachsabweichung vom Mittelwert und für den Anteil der diese aufweisenden Bäume am Stichprobenumfang angesichts der sehr verschiedenartigen Versuchsbestände wenig sinnvoll ist. Außerdem lässt sich die Frage, welche dieser baum- und bestandesbezogenen *thresholds* am sinnvollsten sind, das heißt am aussagekräftigsten in Bezug auf die zur Verfügung stehenden Daten und die Forschungsfrage, nicht zufriedenstellend klären (siehe 2.3.3; BIJAK 2008). Stattdessen stützt sich die Weiserjahrbestimmung im Folgenden auf die Verteilungseigenschaften der Jahrringindex-(JRI-) Werte aller in der Stichprobe nach Ausreißer-Eliminierung verbliebenen Bäume, vor allem auf die jährlichen Mittelwerte x_m und deren Standardabweichungen s . Dazu wird untersucht, wo sich die Differenz $x_m - s$ beziehungsweise die Summe $x_m + s$ im Vergleich mit einer Bezugslinie bei $y = 1$ befindet. Liegt $x_m - s$ über 1, dann ist das betreffende Jahr ein "positives Weiserjahr", liegt $x_m + s$ darunter, ist es ein "negatives Weiserjahr". Bei Annahme normalverteilter JRI-Werte schließt der Interquartilsbereich zwischen $x_m - s$ und $x_m + s$ etwa 68,3 % der möglichen Realisierung des Jahrringindex ein (CRAWLEY 2007, siehe Abb. 3-24).

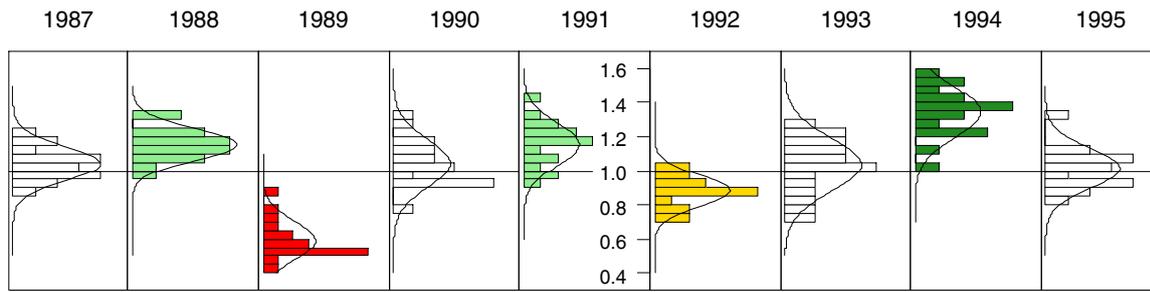


Abb. 3-24: Weiserjahrdefinition auf Basis der jährlichen Häufigkeitsverteilungen der baumindividuellen Jahrringindex-Werte am Beispiel der Jahre 1987-1995 für die Stichprobe aus dem herrschenden Bestand der Kernfläche K1 ($n = 18$). Die Abszisse zeigt die relative Häufigkeit, die Ordinate den Jahrringindex (dimensionslos). Einfach positive Weiserjahre (WJ; 1988 und 1991) sind hellgrün, einfach negative (1992) hellorange gekennzeichnet. Grün kennzeichnet extrem positive (1994), rot extrem negative WJ (1989).

Besonders prägnante Weiserjahre werden mit Hilfe der "Verteilungsenden" identifiziert. Als "oberes" Verteilungsende (auf Boxplots wie in Abb. 3-25 bezogen) gilt – je nachdem, welcher Wert kleiner ist – entweder der größte Einzel-JRI oder die Summe aus Mittelwert und doppelter Standardabweichung. Das "untere" Verteilungsende ergibt sich analog aus dem kleinsten JRI oder aus der Differenz von Mittelwert und doppelter Standardabweichung, je nachdem, welcher Wert größer ist. Ist das obere Verteilungsende kleiner als 1, dann wird dieses Jahr als extrem negatives Weiserjahr bezeichnet, ist das untere Verteilungsende größer als 1, ist es ein extrem positives Weiserjahr. Die beschriebenen Regeln erklärt zusätzlich zu Abb. 3-24 die Abb. 3-25; dort sind zum Beispiel die Jahre 1989 und 2003 negative Weiserjahre, das Jahr 1989 sogar extrem negativ, während es sich bei 1994 und 1999 um positive Weiserjahre handelt, 1994 um ein extrem positives.

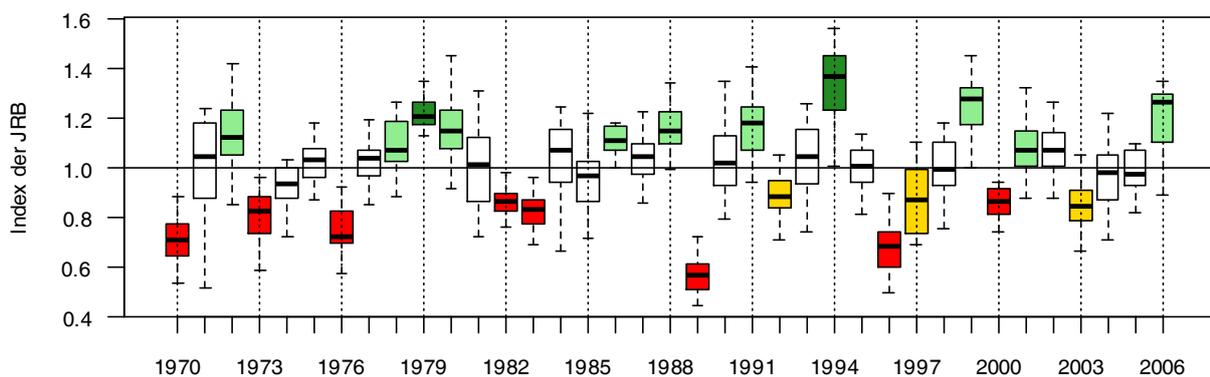


Abb. 3-25: Beispiel für die Identifikation von Weiserjahren anhand der Jahrringindex-Werte, Versuchsfläche K1, $n = 18$ herrschende Bäume. Die Boxes schließen den Bereich $x_m - s$ bis $x_m + s$ ein, die verbundenen waagerechten Linien in den Boxes zeigen den Median an. Rot sind extrem negative Weiserjahre gekennzeichnet, gelb steht für negative, blassgrün für positive und grün für extrem positive Weiserjahre (siehe Text und Abb. 3-24).

Die Identifikation der Weiserjahre erfolgte auf den Flächen K1 bis K5 jeweils für den herrschenden ("1+2") und den beherrschten Bestand ("3+4"), da ausreichend Bohrkernstichproben zur Verfügung standen. Der Vergleich der beiden Gruppen trägt dazu bei, die These einer geringeren Deutlichkeit des Witterungssignals bei Bäumen unter Konkurrenzeinfluss zu prüfen (siehe 2.5, Seite 57). Wegen des geringeren Stichprobenumfangs ließen sich die Weiserjahre auf den Zusatzflächen nur für die Gruppe "1+2" ermitteln.

Die Ähnlichkeit sowohl der Teilbestände als auch der Flächen hinsichtlich des Weiserjahr-Auftretens wird mit Hilfe von Cluster-Analysen in der Statistiksoftware "R" geprüft. Da sich Weiserjahr-Zeitreihen aus nominal skalierten beziehungsweise binären Variablen aufbauen, lässt sich als Grundlage für die Klassifizierung der "Matching-Koeffizient" nutzen, zu dessen Berechnung man die Werte aus der Kontingenztabelle zweier Zeitreihen heranzieht (GOWER 1971). Am Beispiel der einfachen negativen Weiserjahre für "1+2" und "3+4" für die Trauben-Eichen von K1 soll das verdeutlicht werden:

Tab. 3-5: Kontingenz- beziehungsweise Kreuztabellen für die Zeitreihen der negativen Weiserjahre auf K1 in den verschiedenen Sozialklassen. Links: reale Werte, rechts: Schema (nach GOWER 1971)

		K1 3+4		Σ
		1	0	
K1 1+2	1	24	7	31
	0	0	76	76
Σ		24	83	107

		B		Σ
		1	0	
A	1	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a+b</i>
	0	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>c+d</i>
Σ		<i>a+c</i>	<i>b+d</i>	<i>v</i>

Die Spalte "1" der Tab. 3-5 enthält wie die Zeile "1" alle Weiserjahre in den beiden Zeitreihen, die Tabellenfelder geben die Anzahlen des Auftretens der einzelnen Kombinationen wieder. Demnach gibt es sieben Jahre, in denen die Bohrkernproben für den herrschenden Bestand ein Weiserjahr anzeigen, das im beherrschten Bestand so nicht feststellbar war. In 24 Fällen gab es in beiden Sozialklassen ein Weiserjahr, in 76 Fällen keines. Die Gesamtzahl der Übereinstimmung beträgt demnach 100, das entspricht $(100 \cdot 100) / 107 = 93,5\%$. Die Angaben der Kontingenztabelle gehen nun entsprechend dem Schema rechts in Tab. 3-5 in die Berechnung des Matching-Koeffizienten k_m ein (Formel 3-11). Diese auch "Gower-Koeffizient" genannte Ähnlichkeitsmaßzahl bewegt sich im Wertebereich von $0 \leq k_m \leq 1$.

$$k_m = \frac{a + \delta \cdot d}{a + \delta \cdot d + \lambda \cdot (b + c)} \quad \text{Formel 3-11}$$

Mit k_m = Matching-Koeffizient; a, b, c, d = Kontingenzwerte nach Tab. 3-5; δ, λ = Koeffizienten (GOWER 1971)

Mit Hilfe der Koeffizienten δ und λ lassen sich bestimmte Fälle der Übereinstimmung unterschiedlich gewichten, zum Beispiel Jahre mit parallelem Auftreten von Weiserjahren in Abgrenzung von Parallelfällen ohne Weiserjahr. Zur Feststellung der Ähnlichkeit zwischen zwei Zeitreihen wird dies hier nicht als nötig erachtet, deshalb werden δ und $\lambda = 1$ gesetzt. Es ergibt sich ein vereinfachter Matching-Koeffizient mit $k_m = (a+d)/v$, der im Fall oben 0,935 beträgt. Der Vergleich mehrerer Variablen beziehungsweise Zeitreihen erfolgt auf Basis einer Ähnlichkeits-Matrix, die die k_m -Werte aller paarweisen Kombinationen enthält. Diese Informationen lassen sich mit einem Dendrogramm nach vorheriger hierarchischer Cluster-Analyse anschaulich darstellen. Zur Durchführung der beschriebenen Arbeitsschritte werden Funktionen aus dem R-package "cluster" genutzt, zum einen für die Flächen K1 bis K5, zum anderen für die Zusatzflächen mit Ausnahme der Bestände, deren Trauben-Eichen jünger als 50 Jahre sind.

3.4 Analyse der Beziehungen zwischen Witterung, Zuwachs und Vitalität

3.4.1 Ableitung von Witterungsparametern für Vergangenheit und Zukunft

Für die Untersuchungen zu möglichen Einflüssen auf die Vitalität bzw. das Wachstum sind in diesem Rahmen die Lufttemperatur als Durchschnittswert eines Tages, Monats oder Jahres sowie der Niederschlag als Summe zum Beispiel eines Monats oder der Vegetationsperiode von Bedeutung. Diese "primären" Messgrößen sind in der Regel mit hoher Zuverlässigkeit verfügbar und können auch für bisher unbekannte Flächen aus benachbarten Klimastationen bezogen werden. Sie gehen auf der Ebene des Einzelbestands in die Analysen ein und erlauben somit den Vergleich mit bestandes- und baumartbezogenen Mittelwerten. Wegen ihrer relativ weiten geografischen Entfernung voneinander sowie ihrer Ähnlichkeit hinsichtlich der Nährkraft der Standorte, des Alters der Baumarten und der räumlichen Bestandesstruktur stehen in diesem Teilthema die Kernflächen im Fokus der Untersuchungen. Unterschiede, die auf den Einfluss der Witterung zurückzuführen sind, müssten sich hier besonders gut feststellen lassen.

Die tagesbezogenen Mittelwerte der Temperatur und die Niederschlagssummen wurden vom Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde sowie vom "Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung" (PIK) zur Verfügung gestellt. Für die in Deutschland gelegenen Kernflächen handelt es sich im Zeitraum 1996-2006 um direkte Messwerte der Klimastationen, die sich auf Dauerbeobachtungsflächen (DBF) des Level-II-Programms zum langfristigen Waldmonitoring der EU befinden. Die für die einzelnen Flächen bzw. Flächenkomplexe repräsentativen Stationen (Tab. 3-6) befinden sich in meist unmittelbarer Nähe der Kernflächen. Die Zeitreihen von 1951 bis 1996 setzen sich aus Daten zusammen, die auf Basis interpolierter Werte benachbarter Stationen des Meteorologischen Dienstes der DDR bzw. des Deutschen Wetterdienstes (nach 1990) an die konkreten Messungen der Level-II-Stationen angeglichen wurden. Witterungszeitreihen in tagesgenauer Auflösung zu den

polnischen Versuchsstandorten K4 und K5 ließen sich nur durch räumliche Interpolations-Modellierung aus den Messwerten etwas weiter entfernt gelegener Stationen für den Zeitraum 1958-2002 bilden. Die Daten wurden ebenfalls durch das PIK im Rahmen des Oak-Chain-Projekts aufbereitet (SUCKOW et al. 2009). Monatswerte für die Jahre 2003-2006 wurden durch regressionsanalytische Extrapolation dieser Daten auf Basis von Informationen für die Stationen Wrocław (K4) und Kielce (K5) hergeleitet.

Tab. 3-6: Klimastationen, deren Messungen in die Bildung von Witterungszeitreihen für die Kernflächen eingingen. Angegeben sind die Mittelwerte der Perioden 1971-2000.

Station	Fläche	H. ü. NN [m]	JM T [°C]	JS N [mm]	Art der Station
1) Natteheide	K1	60	8,8	527	Level-II-DBF
2) Neusorgefeld	K2	125	8,8	552	Level-II-DBF
3) Fünfeichen	K3	100	9,0	524	Level-II-DBF
4) Wrocław	K4	110	8,7	570	Klimastation
5) Kielce	K5	260	7,4	598	Klimastation

H. ü. NN = Höhe über Normalnull; JM T = Jahresmitteltemperatur; JS N = Jahressumme der Niederschläge; DBF = Dauerbeobachtungsfläche

Um die Beziehungen zwischen dem Radialzuwachs und Jahreswerten der Witterungsparameter zu prüfen, werden nicht die absoluten Werte von Temperatur und Niederschlag genutzt, sondern deren Abweichungen von langjährigen arithmetischen Mittelwerten. Die Bezugszeiträume für die Mittelbildung sind dabei nicht die gesamte Länge des Messzeitraums 1951-2006, sondern wandernde Fenster von 30 Jahren Länge. Damit wird der Annahme Rechnung getragen, dass der Witterungs-Zuwachs-Komplex ein dynamisches Verhalten zeigt, das Anpassungsreaktionen einschließen kann (BECK 2009).

Die Einschätzung der Zukunftschancen für die Trauben-Eiche in Brandenburg in dieser Arbeit stützt sich zum Teil auf die Aussagen des Analysewerkzeugs CLIMTREG (3.4.2) hinsichtlich ihres möglichen Wuchsverhaltens unter zukünftigen Klimaverhältnissen. Für die Witterungsentwicklung in den kommenden Jahrzehnten liefern unterschiedliche Modelle je nach Szenario verschiedene Prognosen, deshalb ist es bei der Integration zukünftiger Witterungsdaten in Simulationsrechnungen unerlässlich, das zugrundeliegende Modellsystem anzugeben (LINKE et al. 2010). Da sowohl OakChain als auch INKA BB das statistische Regionalmodell "STAR" beziehungsweise "STAR 2" des PIK Potsdam nutzen, sollen auch hier dessen Szenarien verwendet werden.

STAR 2 regionalisiert das globale Klimamodell ECHAM5 des Max-Planck-Instituts Hamburg auf der Basis der meteorologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (ORLOWSKY et al. 2008; LOTZE-CAMPEN et al. 2009). Es nimmt als treibende Größe eine bestimmte Temperatursteigerung an und bildet auf der Basis realer Stationsdaten eine große

Anzahl von Modell-Läufen für Tageswerte der Temperatur über den Zeitraum 2007-2060¹. In diesen Tageswerten werden der allgemeine Temperaturtrend, die Temperaturverteilung im Jahr und Korrekturen berücksichtigt, die die simulierten Zeitreihen möglichst nah an plausiblen, da in den Messreihen der Referenzperiode 1951-2000 enthaltenen meteorologischen Mustern halten. Den von STAR 2 genutzten Globaldaten liegen ECHAM5-Läufe für das IPCC-Emissionsszenario A1B zugrunde (IPCC 2000; siehe 2.4.2).

Ein Vorteil von STAR 2 liegt darin, dass das Programm die Szenariozeitreihen, die erst einmal nur den Temperaturverlauf wiedergeben, mit realen Tagen aus dem Messvorrat der Referenzperiode füllt, die anhand temperaturbezogener Charakteristika wie Tagesamplitude, Maximal- und Minimalwerte oder Temperatur der vorangegangenen Tage ausgewählt werden. So lassen sich alle übrigen Parameter in ihrer Kombination mit der Temperatur aus realen, gemessenen Tagen abgreifen (ORLOWSKY et al. 2008; LINKE et al. 2010). Welche Tage ausgewählt werden und welche Jahresabschnitte zuvor in die Bildung der simulierten Zeitreihen eingehen, wird durch mehrere stochastische Prozesse gesteuert. Das Programm erzeugt dadurch je nach Modelldurchlauf verschiedene Szenariorealisationen mit unterschiedlichen Ausprägungen der Witterungsparameter (bis auf den stabil gehaltenen zentralen Temperaturtrend). Man erhält also nach einer hinreichend großen Zahl von Durchläufen ein statistisch auswertbares Stichprobenkollektiv mit konstantem Temperaturtrend, das anhand der Niederschlagsverhältnisse gruppiert werden kann. Es entsteht ein quasi normalverteiltes Spektrum zwischen extrem trockenen und extrem feuchten Verhältnissen. Für die Verwendung mit CLIMTREG wurde im Einklang mit Beobachtungen der realen globalen Emissionsentwicklung ein Ansatz mit zwei Kelvin Temperatursteigerung bis 2060 in einem mittleren Feuchtigkeitsszenario (Median der Feuchtigkeitsparameter) ausgewählt. Da die Daten die polnischen Flächen nicht mit abdecken, ist nur für K1, K2, K3 und ausgewählte Zusatzflächen die Abschätzung des Zuwachsverhaltens unter Klimawandel möglich. Für K2 wurden die Szenariodaten der Station Hohenbucko, für K3 der Station Beeskow und für K1 das Mittel der vier nächstgelegenen Stationen verwendet (siehe Anhang 8.6).

Die Witterung auf den Zusatzflächen, die sich in Ost- und Südostbrandenburg befinden, wird durch Daten charakterisiert, die vom PIK in Potsdam für die Nutzung im Projekt "Innovationsnetzwerk Klimawandel Brandenburg/Berlin" (INKA BB) bereitgestellt und durch Dr. Uwe Heinrich vom Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) aufbereitet wurden (GUERICKE et al. 2010). Zu einem großen Teil handelt es sich dabei um Messwerte, die von Station zu Station unterschiedlich auftretenden Datenlücken wurden durch geostatistische Modelle geschlossen. In die weitere Auswertung gehen die Tageswerte von Niederschlag und mittlerer Temperatur für eine an der Lage der Zusatzflächen orientierte Auswahl von Klimastationen ein. Im Weiteren werden die ausgewählten Stationen als "Referenzstationen" bezeichnet. Die Informationen für die Referenzstationen wurden zu einem mittleren Verlauf der Tageswerte beider Witterungsparameter verdichtet, der für das Untersuchungsgebiet als repräsentativ angenommen wird und ebenfalls den Zeitraum 1951-2006 abdeckt.

¹ Auch die stationsbezogenen Szenariodaten 2007-2060 wurden vom PIK für das Projekt INKA BB zur Verfügung gestellt und am ZALF durch Dr. Uwe Heinrich aufbereitet.

Die Lage der ausgewählten Klimastationen stellt Abb. 3-26 dar, der Verlauf der Witterungsparameter für das Mittel der Stationen ist im Anhang 8.6 enthalten.

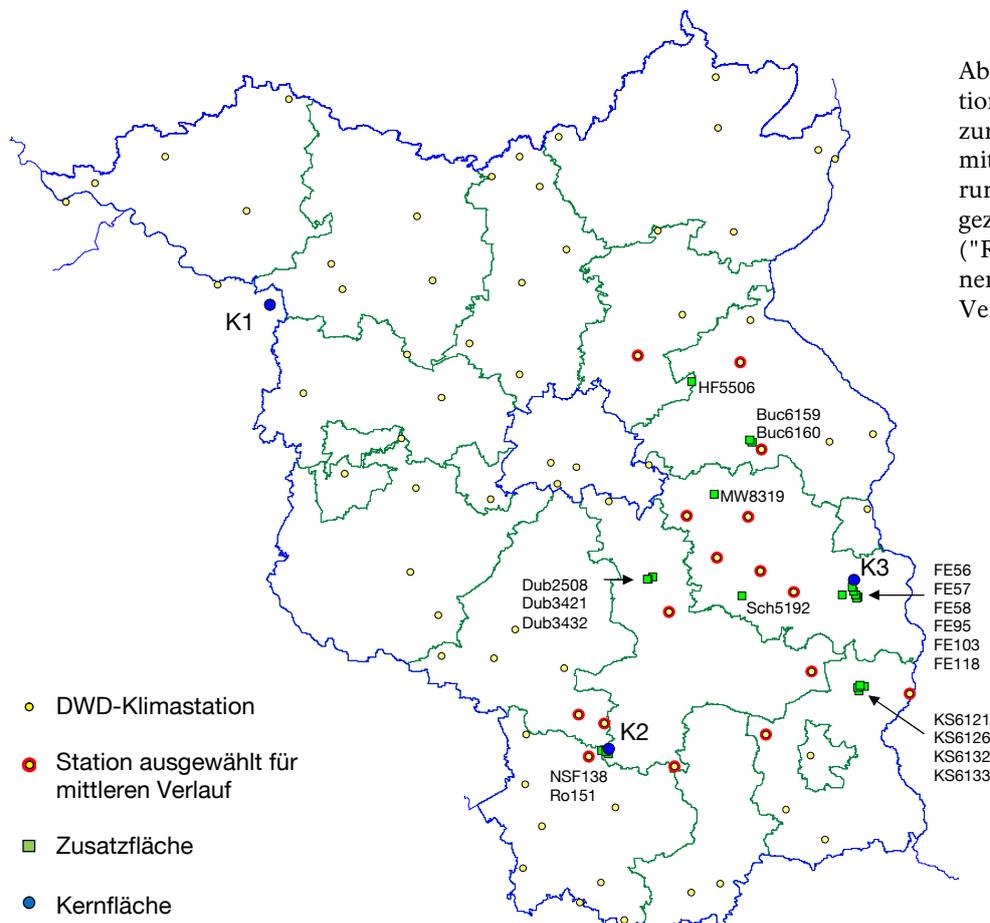


Abb. 3-26: Klimastationen des DWD, die zur Herleitung eines mittleren Witterungsverlaufs herangezogen wurden ("Referenzstationen") und Lage der Versuchsflächen

Auf den unterschiedlichen Auswertungsebenen werden verschiedene Aggregationsstufen der Tageswerte verwendet: Während CLIMTREG mit den unveränderten Tageswerten arbeitet, nutzen die Korrelations- und *response-function*-Analysen mit "bootRes" auch für die Zusatzflächen die zu Monatswerten verdichteten Daten. Zur Analyse auf Jahresebene dienen – wie für die Kernflächen beschrieben – die Differenzverläufe zu den langjährigen Mitteln von Temperatur und Niederschlag.

Zur vergleichenden Einordnung der Wuchsverhältnisse an einem Standort bieten sich Indizes als aggregierende Zahlenwerte an. Bereits in 3.1.2 wurden anhand des Trockenheitsindex nach DE MARTONNE (1926) und des Indexes der Kontinentalität nach GORCZYNSKI (1920) die Gegebenheiten an den untersuchten Flächenkomplexen charakterisiert. Der Index nach DE MARTONNE berechnen sich wie folgt (Formel 3-12):

$$TI = P / (T + 10)$$

Formel 3-12

TI = Trockenheitsindex; P = Niederschlag [mm]; T = Temperatur [°C]

Niederschläge gehen in den TI als Summen, Temperaturen als Mittelwerte ein. Indexwerte werden üblicherweise für ganze Jahre berechnet. Studien zur Prüfung dendroklimatischer Zusammenhänge verwenden zum Teil auch einzelne Monate (zum Beispiel CUFAR et al. 2008). Um mit Jahressummen vergleichbare Werte zu erhalten, wird die Niederschlagssumme in diesen Fällen mit zwölf multipliziert. Die Auswertungen im Abschnitt 4.3.1 umfassen neben den Jahreswerten auch die Daten für die Vegetationsperiode von April bis August mit den Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen dieser Periode als Eingangsgrößen. Je höher bei gleichem Bezug der TI , desto geringer ist die mit diesem Index geschätzte Trockenheit. Der Kontinentalitätsindex (Formel 3-13) verwendet die Differenz zwischen der Durchschnittstemperatur des wärmsten und der des kältesten Monats ("Temperaturamplitude") in Bezug auf die geografische Lage des Untersuchungsgebiets:

$$K = 1,7 \cdot (\Delta T / \sin \varphi) - 20,4 \quad \text{Formel 3-13}$$

K = Kontinentalitätsindex; ΔT = Temperaturamplitude $T_{\max} - T_{\min}$; φ = geografische Breite

Die Kontinentalität bewegt sich theoretisch in einem Wertebereich zwischen 0 und 100, höhere Werte zeigen eine stärkere kontinentale Prägung des Klimas an (DRISCOLL & FONG 1992). In der Regel wird der Parameter nur anhand von Mittelwerten längerer Zeiträume berechnet; zur Prüfung möglicher Zusammenhänge zum Jahrringindex nutzt diese Arbeit ausnahmsweise auch Jahreswerte.

3.4.2 Die Analyseprogramme "CLIMTREG" und "bootRes"

Zur Analyse der Beziehungen zwischen Jahrringbreiten und Witterungsparametern ist am Institut für Waldökologie und Waldinventuren des Thünen-Institut für Waldökosysteme¹ seit mehreren Jahren ein Programm zur Datenaufbereitung und Analyse entwickelt worden, das mittlerweile in der vierten Version unter dem Namen "CLIMTREG" (*CLimatic IMPact on TREe Growth*) vorliegt (BECK 2007; SCHRÖDER & BECK 2009; BECK et al. 2013). Das Paket aus mehreren Programmen enthält unter anderem Module zum Datenimport, zur Aufbereitung der Jahrringinformation und zur Analyse dendroklimatologischer Zusammenhänge. Der Ablauf wird grafisch unterstützt, als Ergebnisse entstehen sowohl Bitmap-Dateien aller wichtigen Diagramme als auch eine Vielzahl von Tabellen, die im CSV-Format die Eingangs- und die programmgenerierten Ergebnisdaten speichern. CLIMTREG entstand in der Entwicklungsumgebung "GFA Basic" und wird auf Anfrage in einer eigenständig lauffähigen Version weitergegeben². Zum grundlegenden Verständnis des Programms und der in dieser Arbeit genutzten Elemente sollen die wesentlichen Charakteristi-

¹ Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei

² Kontakt: Dr. Wolfgang Beck, wolfgang.beck@ti.bund.de

ka kurz erläutert werden; detailliertere Erklärungen finden sich weiter unten in den Abschnitten, die das konkrete Vorgehen bei der eigenen Arbeit beschreiben.

Den Kern des Analyseprogramms bilden die Routinen zur statistischen Auswertung der Beziehungen zwischen Zuwachs- und Witterungsdaten. Die Zuwachsinformationen lassen sich direkt als extern hergeleitete Jahrringindex-Zeitreihen (siehe 2.3.3) einsteuern, alternativ kann man auch interne *pre-whitening*-Algorithmen zur Herleitung von Indizes aus Zeitreihen des Brusthöhendurchmessers ohne Rinde nutzen (3.3.1). Witterungsparameter fließen in Form getrennter Dateien mit Tageswerten von Niederschlagssumme und Mitteltemperatur für eine beliebige Abfolge von Jahren ein. Für diesen Zeitraum oder wählbare Teile davon erzeugt das Programm einen mittleren Verlauf sowie die täglichen Abweichungen davon; letztere bilden als intervallbezogen kumulierbare Bilanzen den Bezug für die Analyse der Witterungswirkungen auf den Zuwachs.

Methodisch basiert CLIMTREG auf den Annahmen, dass

- das Baumwachstum von den Wirkungen der Witterung in bestimmten, zunächst nicht genau bekannten, innerjährlichen Zeiträumen abhängt;
- die Witterungseinflüsse durch die Verwendung von Monatswerten der Witterungsgrößen, wie sie zahlreichen Regressions- und *response-function*-Ansätzen zu Grunde liegen, nur unzureichend erfasst werden können.

Als Konsequenz erfolgt eine automatisierte und objektivierte Auswahl von Witterungsvariablen, die entsprechend ihrer innerjährlichen Lage und Dauer die stärksten signifikanten Korrelationen zur Zeitreihe des Jahrringindexes aufweisen. Die Korrelationsrechnungen erfassen nacheinander alle rechnerisch möglichen Intervalle mit einer Mindestlänge von 21 und einer Höchstlänge von 121 Tagen für den Zeitraum zwischen dem 01.07. des Vorjahres und dem 31.10. des laufenden Jahres. Analog zu den im Programm DENDROCLIM2002 von BIONDI & WAIKUL (2004) implementierten "*moving windows*" (gleitende Zeitfenster) erlaubt nun auch die vierte Version von CLIMTREG, mögliche temporale Veränderungen in den Witterungs-Zuwachs-Beziehungen zu berücksichtigen. Dazu kann man innerhalb des sowohl von den Zuwachszeitreihen als auch von Witterungsdaten abgedeckten gemeinsamen Zeitintervalls Abschnitte wählbarer Länge definieren, die sich jahrweise vom Beginn bis zum Ende des gemeinsamen Intervalls verlagern (BECK et al. 2013).

Sowohl für den Temperatur- als auch für den Niederschlagseinfluss werden jeweils maximal fünf Variable, die die stärksten Korrelationen zur Zeitreihe des Jahrringindexes zeigen und untereinander zeitlich disjunkt sind, ermittelt und für nachfolgende Regressionsrechnungen gespeichert. Aus den individuellen Kombinationen von Lage und Länge des jeweiligen Zeitfensters für die beiden Witterungsparameter ergeben sich so maximal zehn Variab-

len¹. Abb. 3-27 zeigt beispielhaft eine graphische Darstellung aus CLIMTREG, die das systematische Analysieren des zeitlichen Kontinuums nachvollziehbar macht.

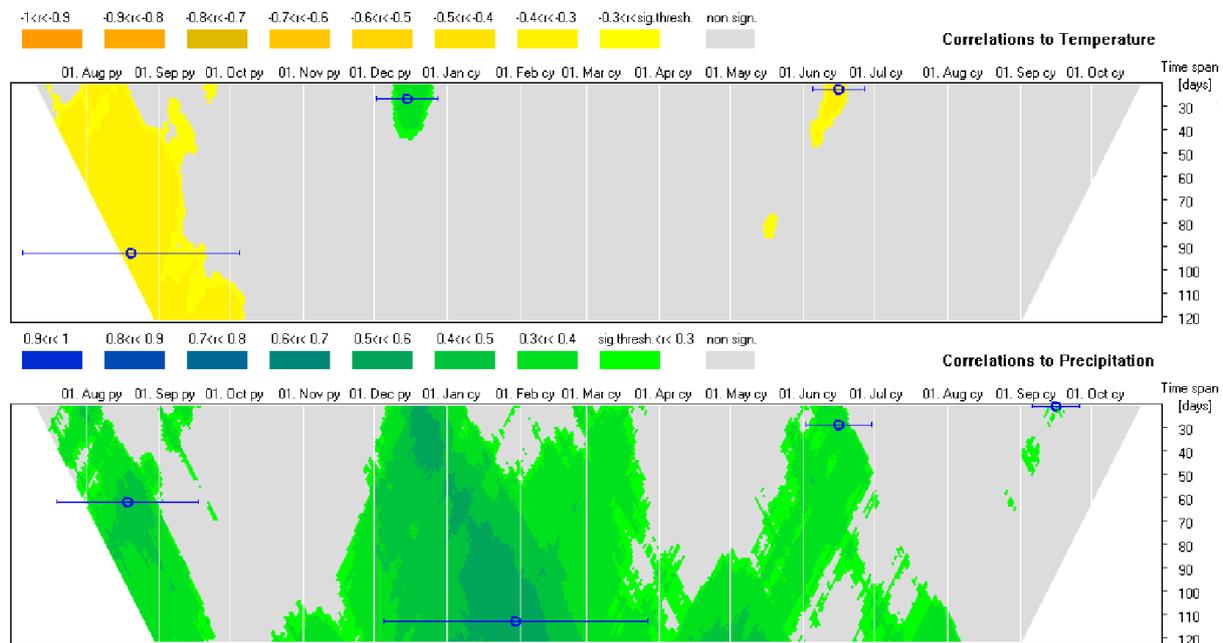


Abb. 3-27: Screenshot aus Teil 1 des Softwarepakets CLIMTREG. Die programminterne Grafik verdeutlicht die Position und Länge der zuwachswirksamen Intervalle von Temperatur und Niederschlag.

In Abb. 3-27 sind die stärksten signifikanten Korrelationskoeffizienten von Temperatur- (oben) und Niederschlagsvariablen zum Jahrringindex in den möglichen 42.218 Kombinationen aus Länge und Lage der innerjährlichen Zeitintervalle farblich codiert dargestellt – Gelb- bis Rottöne zeigen negative, Blau- bis Grüntöne positive Korrelationskoeffizienten an. Waagerechte blaue Linien markieren die zeitlichen Grenzen der Intervalle mit den höchsten Korrelationskoeffizienten in ihrer Lage im Bezugszeitraum und der Anzahl von Tagen. Maximal fünf dieser Intervalle, die sich nicht überlappen, werden je Witterungsgröße für die weitere Modellierung ausgewählt.

Im nächsten Schritt gehen diese ausgewählten Intervalle in eine Hauptkomponenten-Analyse (PCA) ein, die zur Entfernung der Interkorrelationen zwischen den einzelnen Witterungsvariablen dient. Als Ergebnis der PCA werden Eigenvektoren beziehungsweise Hauptkomponenten ausgeschieden, die anhand ihres Anteils an der Gesamtvarianz geordnet sind. In einem "scree-plot" (benannt nach der Form der Kurve, die einem Steilhang mit darunter waagrecht auslaufendem Geröll [englisch "scree"] gleicht) lassen sich die Eigenwerte der gebildeten Hauptkomponenten und die kumulative Varianz darstellen. Der anschließenden Hauptkomponenten-Regression kann man eine frei wählbare Anzahl von Hauptkomponenten zuführen, oder man lässt die Auswahl über einen Optimierungsansatz

¹ Sind weniger als fünf sich nicht überlappende Zeiträume je Witterungsfaktor statistisch signifikant mit dem Jahrringindex korreliert, dann gehen auch weniger Variablen in die weiteren Berechnungen ein.

laufen (analog zu einem aufbauenden linearen Regressionsmodell). Im zweiten Fall werden nicht signifikante Prädiktoren mit Hilfe von t-Tests identifiziert und aus dem Modellansatz entfernt. Das so herausgearbeitete Modell wird anhand des Bestimmtheitsmaßes seiner Beziehung zur Original-Jahrringindex-Zeitreihe, des Verhältnisses der Sensitivitäten von Mess- und Modellwertzeitreihe sowie des Informationskriteriums AIC nach AKAIKE (1974) evaluiert. Zusätzlich erfolgt die Prüfung der Modellresiduen auf Normalverteilung durch den KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test. CLIMTREG analysiert die Sensitivität des Modells, indem jede einzelne enthaltene Witterungsvariable in ihrem Einfluss auf den Jahrringindex betrachtet wird. Dazu werden alle anderen im Modell vorhandenen Variablen mit ihrem Mittelwert belegt. Die Spannweite der Wirkung der ausgewählten Variablen auf den Jahrringindex wird durch Boxplots dargestellt (Abb. 3-28).

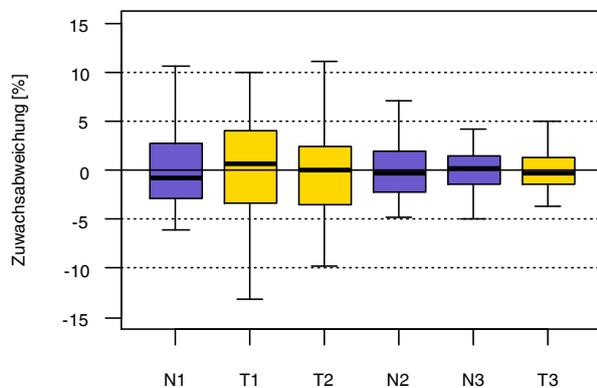


Abb. 3-28: Sensitivität des von CLIMTREG aufgestellten Modells für die Witterungs-Zuwachs-Beziehung mit sechs Parametern im Vorjahr (VJ) und aktuellen Jahr (AJ), N1 = Niederschlag (N; blau) 24.11.-31.12. VJ, T1 = Temperatur (T; orange) 6.4.-13.6. AJ, T2 = T 28.7.-17.8. VJ, N2 = 20.7.-11.8. VJ, N3 = 24.9.-23.10. AJ und T3 = 23.1.-13.2. AJ. Die Boxplots zeigen die prozentuale Zuwachsabweichung als Wirkung des zur empirischen Verteilung proportionalen Schwankens der Variablen zwischen ihrem Minimum und Maximum, wenn man die übrigen Variablen auf ihren Mittelwert setzt (Beispiel: K3, Sozialklasse 1+2, 1951-2006).

Die Sensitivitäts-Diagramme sind wie folgt zu interpretieren: Die größten Abweichungen vom Mittelwert im Radialzuwachs mit knapp 13 % ergeben sich in Abb. 3-28 für den Modellfaktor "T1", das heißt für die Temperaturen im Frühling (06.04.-13.06.). Die Werte ergeben sich in Abhängigkeit von den Ausprägungen dieses Faktors im Kalibrierungszeitraum bei gleichzeitiger Fixierung aller weiteren auf ihren Mittelwert im selben Zeitraum.

Technisch ist der beschriebene Gesamtablauf in zwei Programmteile zerlegt. Im ersten Teil finden – wenn keine selbst hergeleiteten Jahrringindex-Zeitreihen eingesteuert werden – die Datenaufbereitung mittels *pre-whitening* sowie die Korrelationsanalysen für die Beziehungen von Niederschlag und Temperatur in den von 21 bis 121 Tagen zunehmenden Zeiträumen mit dem Jahrringindex statt. Im zweiten Teil erfolgt der Modellaufbau durch Hauptkomponentenanalyse und -regression. Falls dies gewünscht ist und die nötigen tagesaufgelösten Szenariodaten verfügbar sind, lässt sich abschließend die Wirkung zukünftiger Witterungsausprägungen auf die Entwicklung des Jahrringindex darstellen.

Das R-Paket "bootRes" ist von ZANG (2009) an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf auf Basis des Programms DENDROCLIM2002 (BIONDI & WAIKUL 2004) entwickelt worden und transferiert die dort angelegten Routinen auf die vom Betriebssystem unabhängige Plattform des Statistikprogramms R (ZANG & BIONDI 2012). Es ermöglicht Korrelations-

und *response-functions*-Analysen für die Beziehungen zwischen Zeitreihen der Monatswerte von Witterungsparametern und Jahrringindex-Zeitreihen.

Response functions und Korrelationen lassen sich sowohl mit als auch ohne "*bootstrapping*" beim Ermitteln der Koeffizienten und der multiplen Korrelation bestimmen. Im *bootstrapped*-Modus werden 1000 zufällige Stichproben (mit "Zurücklegen") aus dem Original-Datensatz gezogen, an denen jeweils die Hauptkomponentenregression erfolgt, das Programm gibt anschließend die Mittel der multiplen Korrelationskoeffizienten sowie der Parameterkoeffizienten aus (GUIOT 1991). Ein solches Vorgehen liefert statistisch deutlich belastbarere Ergebnisse der Analysen, deshalb wird dieser Teil der Auswertungen in der *bootstrapped*-Variante durchgeführt. Signifikant sind die *bootstrapped*-Koeffizienten, wenn sie mindestens doppelt so groß sind wie das 95-Prozent-Konfidenzintervall (ZANG 2009). Auch die angegebenen Korrelationskoeffizienten nach PEARSON werden nach dieser Methode auf Signifikanz getestet.

Die Zeitspanne, innerhalb derer die Monatswerte der Witterungsparameter in die Analysen eingehen sollen, lässt sich frei wählen, sie beginnt üblicherweise vor der Vegetationsperiode des Vorjahres und zieht sich bis in den Herbst des aktuellen Jahres (BIONDI & WAIKUL 2004; ZANG et al. 2012). Die Ergebnisausgabe erfolgt zum einen durch graphische Darstellungen, die sich an den Monaten und dem Bezugsintervall (auf Jahresebene) orientieren (Abb. 3-29). Zusätzlich lassen sich die berechneten Korrelationskoeffizienten beziehungsweise *response-function*-Werte als Tabelle ausgeben sowie durch geeignete R-Befehle transformieren und speichern.

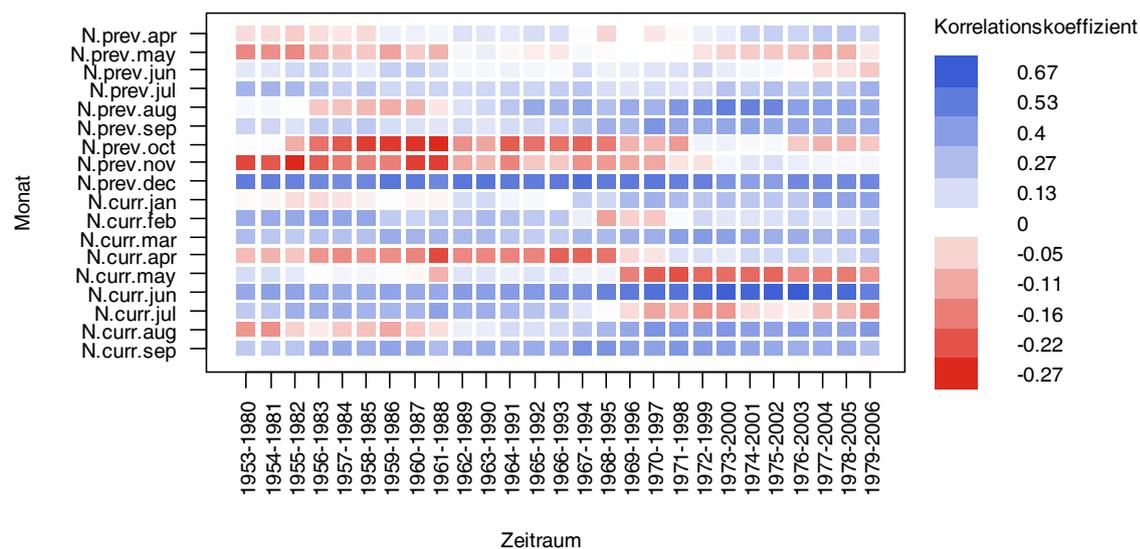


Abb. 3-29: Beispiel der Ergebnisausgabe durch das R-Paket "bootRes". Dargestellt sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den Niederschlagssummen der Monate vom April des Vorjahres (N.prev.apr) bis zum September des aktuellen Jahres (N.curr.sep) einerseits und dem Jahrringindexwert andererseits, hier für den herrschenden Bestand auf der Fläche K1. Die Abszisse zeigt die Ergebnisse in den durch "*moving windows*" untersuchten Teilzeiträumen des gesamten Datenbereichs von 1951-2006. Das wandernde Fenster hat hier eine Länge von 28 Jahren und rückt jeweils ein Jahr weiter.

Für einzeln ausgewertete Intervalle, deren Beginn und Ende frei wählbar sind, erfolgt die Ausgabe der Korrelationskoeffizienten oder der *response-function*-Koeffizienten mit den zugehörigen Konfidenzintervallen in Säulendiagrammen (Abb. 3-30). Statistisch signifikante Koeffizienten werden als dunklere Säulen grafisch hervorgehoben.

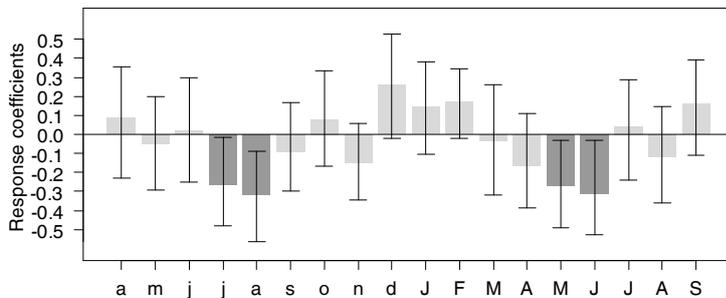


Abb. 3-30: Response-Koeffizienten der Beziehungen zwischen Monatsmitteltemperaturen vom April des Vorjahres (Kleinbuchstaben) bis zum September des Wuchsjahres (Großbuchstaben) und Jahrringindex auf der Fläche FE56 für den Zeitraum 1951-2006. Statistisch signifikant sind die dunkler eingefärbten Monate (Grafik aus *bootRes*, leicht geändert)

3.4.3 Witterungswirkungen auf den Zuwachs

Wie in 2.3.1 beschrieben, muss als Vorbereitung entsprechender Untersuchungen das "Klimasignal" als Anteil der Witterung an der Variation des Zuwachses möglichst scharf herausgearbeitet werden. Die in diesem Prozess erstellten trendbereinigten Chronologien geben die interannuelle Schwankung des Radialzuwachses bzw. der Jahrringbreite wieder. Im Sinne des Begriffs gehört zum Radialzuwachs eines Baumes zwar neben der Jahrringbreite auch der Zuwachs im Phloem, das heißt die Rindenstärkenzunahme, diese kann aber bei der Bohrkernanalyse nicht gemessen, sondern nur indirekt aus der Überführung der relativen JRB-Entwicklung auf das Wachstum des Durchmesser mit Rinde hergeleitet werden (vgl. 3.3.1). Nur wenn im Folgenden ausdrücklich darauf hingewiesen wird, verstehen sich Angaben des Radial- oder Kreisflächenzuwachses einschließlich Rinde, sonst ist ausschließlich der Zuwachs im Xylem bzw. die Jahrringbreite gemeint.

Feinere Auflösungen des Radial- beziehungsweise Kreisflächenzuwachsganges sind grundsätzlich möglich (BUES et al. 1999; BECK 2004; WERF et al. 2007), im Rahmen dieser Arbeit aber nicht erfasst worden. Die verschiedenen Ebenen der Betrachtung beziehen sich vielmehr auf die Witterungsseite des Wirkungszusammenhanges. Wie bereits in 2.3.3 dargestellt, bilden dabei die Jahreswerte, die Monatswerte sowie die in Tagesauflösung vorliegenden Werte der Niederschlagssummen und der Temperaturmittel die drei Ebenen, auf die sich die Analysen konzentrieren. Im Folgenden werden die dabei angewandten Methoden kurz zusammengefasst:

- Die Abschätzung der Einflüsse von Witterungs-*Jahreswerten* erfolgt zum einen anhand der nach 3.3.3 hergeleiteten Weiserjahre, zum anderen auf Basis von Korrelationsanaly-

sen zwischen den Differenzen der Einzeljahre vom langjährigen Mittel in Temperatur und Niederschlag sowie den Jahrringindex- (JRI-) Werten.

- Beziehungen zwischen *Monatswerten* und Zuwachs werden mit Hilfe der Algorithmen zur Korrelations- und *response-functions*-Analyse im R-package "bootRes" quantifiziert (ZANG 2009; siehe 3.4.2). Analysiert werden die signifikanten Korrelationskoeffizienten zwischen Monats- und JRI-Werten sowie die Ergebnisse der *response-function*-Analysen. Beides wird für stationäre Zeiträume berechnet, das heißt für das gesamte von Witterungs- und Zuwachsdaten gemeinsam abgedeckte Intervall ("*common interval*", CIN), sowie für gleitende Fenster von 28 Jahren Länge ("*moving intervals*") über das gemeinsame Intervall (zur Begründung dieser Jahresanzahl siehe unten). Die Analysen erfassen jahresübergreifend die Monate (jeweils einschließlich) von April des Vorjahres bis September des aktuellen Jahres, also je Jahrringindexwert 18 Monate. Die Beziehungen werden für beide Sozialklassen auf den Kernflächen ("1+2" und "3+4") sowie für eine Auswahl an Zusatzflächen dargestellt. Berücksichtigung finden aus jeder der fünf abgrenzbaren Zusatzflächenregionen (siehe Abb. 3-26) die jeweils älteste Fläche. Im Einzelnen sind das Dub2508, FE56, HF5506, KS6132 und NSF138 (siehe Tab. 3-2). Die Auswahl ist ein Kompromiss zwischen der nötigen Detailtiefe der Ergebnisdarstellung und der Absicht, schwerpunkthaft vor allem die Analysemethodik zu demonstrieren.
- Zur Analyse des Witterungs-Zuwachs-Zusammenhangs auf Grundlage objektiv ausgewählter *Zeiträume mit variabler Länge* kommen die entsprechenden Algorithmen des in 3.4.2 bereits beschriebenen Programms CLIMTREG (BECK et al. 2013) zum Einsatz. Die damit hergeleiteten Ergebnisse umfassen die flächen- und sozialklassenbezogen getrennte Ausweisung zuwachsrelevanter Zeiträume nach Lage im Jahresverlauf, Dauer in Tagen und Art der wirkenden Witterungsparameter. Zusätzlich erfolgt eine Evaluierung der Modellsensitivität mit Hilfe von Tests auf die Wirkung der einzelnen Variablen *ceteris paribus* (siehe oben). Außerdem wird betrachtet, wie sich die Ergebnisse der Hauptkomponentenregression unterscheiden zwischen der Berechnung für das CIN und der Berechnung für die ersten und die letzten 28 Jahre dieses Zeitraums (28 Jahre wurden als Teilperiodenlänge gewählt, weil sich das CIN mit insgesamt 56 Jahren so am besten aufteilen lässt – kürzere Perioden können zum Missverhältnis zwischen Prädiktorenanzahl und Intervalllänge führen, längere überlagern sich in der Mitte zu weit). Mit Hilfe der Witterungs-Szenariodaten (siehe 3.4.1) für die STAR-2-Realisierungen auf mittlerem Feuchteniveau bei zwei Kelvin Temperaturzunahme wird abgeschätzt, welche Auswirkungen diese unterschiedlichen Kalibrierungsbereiche (CIN, 28 erste, 28 letzte Jahre) auf die Modellschätzungen für die Entwicklung des Jahrringindex haben. Dargestellt werden wie im Fall der Monatswerte (siehe oben) vorrangig die Ergebnisse für den herrschenden Bestand der Kernflächen und für die ausgewählten Zusatzflächen.

Die Anwendung eines aus historischen Daten abgeleiteten und mit ihnen kalibrierten Modells auf einen Szenariozeitraum, wie CLIMTREG es möglich macht, ist mit der Annahme verbunden, dass die zuwachswirksamen Zeiträume für die einzelnen Witterungsfaktoren

auch in der Zukunft vergleichbare Wirkung auf den Jahrringindex, das heißt die Zuwachsraten, haben. Unterstellt wird dabei die andauernde Wirksamkeit der in der entsprechenden Periode gefundenen Witterungs-Zuwachs-Beziehungen. Mögliche Veränderungen in diesen Beziehungen lassen sich herausarbeiten, wenn man die Effekte verschiedener Modelle einander gegenüberstellt, die auf Basis unterschiedlicher Ausschnitte des gesamten verfügbaren Kalibrierungszeitraums entstanden sind. Für auffällige Differenzen in den Modellwirkungen in Form unterschiedlicher Indexzeitreihen sind grundsätzlich verschiedene Ursachen denkbar:

- (a) Bei konstanter Witterung können sich die Reaktionen der Bäume geändert haben;
- (b) Bei konstanten Reaktionsmechanismen können sich die Witterungseinflüsse in Lage, Dauer und Intensität gewandelt haben;
- (c) Sowohl in den Witterungskonstellationen als auch in den Reaktionen der Bäume können Verschiebungen eingetreten sein.

Der Abschnitt 4.3.1 ab Seite 131 stellt den Verlauf der Witterung in der Beobachtungsperiode seit 1951 dar, die allgemeinen Tendenzen der Klimaentwicklung im Szenariozeitraum bis 2055 sind in 2.4.2 (Seite 50) bereits beschrieben worden. Um die Fähigkeiten eines Baumes zu beurteilen, sich an veränderte Witterungsbedingungen anzupassen, ist es nicht entscheidend, die genauen Anteile der Faktoren (a) bis (c) an der Dynamik in den Wuchsreaktionen zu kennen. Wichtig ist, ob auf der Wirkungsebene – im mittleren Zuwachsverhalten – Veränderungen auftreten, die auf tendenziell abnehmende, stabile oder auch steigende Zuwachsraten und damit Jahrringbreiten hinweisen.

3.4.4 Beziehungen zwischen Vitalität, Zuwachs und Kronengröße

Für den fünfjährigen Zeitraum 2006-2010 liegen sowohl baumindividuelle Anfangs- und Endwerte des BHD als auch (für relativ große Stichproben von Bäumen) Aussagen zur prozentualen Kronenverlichtung und zur Kronenstruktur im Winterzustand vor. Auf dieser Grundlage wird geprüft, welche Beziehungen zwischen dem Kronenzustand als Vitalitätsindikator und den Zuwachsleistungen der Einzelbäume bestehen. Zur Quantifizierung wird wegen des ordinalen Charakters der Kronenvariablen die Rang-Korrelation nach SPEARMAN¹ zwischen dem aus den BHD-Differenzen abgeleiteten Kreisflächenzuwachs und den mittleren Werten von Laubverlust und Kronenstruktur der Jahre 2006-2008 genutzt. Nach den Thesen von HERMS & MATTSON (1992) sind dabei sowohl negative als auch positive Korrelationen denkbar; nicht signifikante Zusammenhänge könnten bedeuten, dass der Kreisflächenzuwachs von anderen Größen als vom Kronenzustand gesteuert wird oder dass mit den gewählten Anspracheverfahren der physiologische beziehungsweise Vitalitätsstatus des Baumes nicht adäquat erfasst werden konnte.

¹ WEISSTEIN, E. W.: Spearman Rank Correlation Coefficient / Wilcoxon Rank Sum Test. From "MathWorld – A Wolfram Web Resource", <http://mathworld.wolfram.com/SpearmanRankCorrelationCoefficient.html> beziehungsweise <http://mathworld.wolfram.com/WilcoxonRankSumTest.html> (16.08.2011)

Über die Zuwachswirkungen hinaus soll zusätzlich geprüft werden, welchen Einfluss die relative Kronengröße auf die Vitalitätsparameter und den Kreisflächenzuwachs hat. Sie berechnet sich als Verhältnis der Kronenschirmfläche zur Stammkreisfläche auf 1,3 Metern Höhe (siehe 3.3). Die positive Wirkung größerer Kronen für den Zuwachs ist in der Literatur zwar seit langem belegt (SPIECKER 1991), die Quantifizierung hier erfolgt vor allem vor dem Hintergrund des häufig schlechten Belaubungs- und Strukturzustands der Eichenkronen, der diese Wirkung aufheben oder abschwächen könnte. Außerdem sind – nach dem HERMS-MATTSON-Modell (2.2.5) – auch negative Wirkungen hoher Abwehraufwendungen auf den in größeren Kronen in stärkerem Maße nötigen jährlichen Biomasseaufbau und damit auf die Zuwachsleistungen denkbar.

Die stochastischen Zusammenhänge zwischen Kronenschirmfläche (KSF) und Kreisflächenzuwachs (iGa) sind dadurch beeinflusst, dass die Baumdimension, das heißt die Kreisfläche als "Kontrollvariable", sowohl mit der KSF als auch mit dem iGa relativ straff korreliert ist (SPIECKER 1991; SCHRÖDER 2004). Deshalb wird zu ihrer Prüfung die Methode der partiellen Korrelationsanalyse mit der Basis-Kreisfläche zu Beginn der ausgewählten Zuwachspanne 2006-2010 als Kontrollvariable angewandt.

4 Ergebnisse

Die Darstellung der Ergebnisse orientiert sich im ersten Abschnitt an den Teiluntersuchungsgebieten, deren Datengrundlage und Methodik im Kapitel 1 vorgestellt wurden. Dazu gehören die Resultate der Erhebungen zum Kronenzustand, die Wuchsleistungen im Untersuchungszeitraum, die Charakteristika der Jahrringbreiten- und der Jahrringindex-Zeitreihen sowie eine Auswahl von Ergebnissen der Programme `bootRes` und `CLIMTREG`. Am Ende des Kapitels steht ein zusammenfassender Überblick mit Fokus auf die Relevanz der Ergebnisse für die Zukunftsaussichten der Eiche in den Brandenburger Wäldern.

4.1 Vitalität

Die Vitalitätsindikatoren Laubverlust und Kronenstruktur wurden auf den Kernflächen nach dem in 3.2.1 und 3.2.2 beschriebenen Verfahren erhoben. Für die Probestämme auf K1, K2 und K3 stehen jährliche Ansprachen beider Parameter von 2006 bis 2010 zur Verfügung, auf den polnischen Flächen K4 und K5 nur Werte für die Jahre 2006-2008. Im zeitigen Frühjahr 2011 fand dort noch einmal eine abschließende Beurteilung der Kronenstruktur im Winter statt. Für die mit Bohrkernen beprobten Trauben-Eichen auf den Zusatzflächen, die generell im Winterhalbjahr aufgenommen wurden, erfolgte eine einmalige Ansprache der Kronenstruktur, sofern das Kriterium ausreichenden Alters erfüllt war (siehe 3.1.4).

4.1.1 Belaubungszustand und Kronenstruktur

Der Sommerzustand der Eichenkronen nach dem Anspracheschlüssel der Waldzustandserhebung (EICHHORN et al. 2006) ergab im Jahr 2006 flächenbezogene Durchschnittswerte, die mit dem bundesweit festgestellten kritischen Kronenzustand der Eichenarten im Einklang stehen (KALLWEIT 2006). Die Entwicklung der mittleren Kronenverlichtung und ihre Verteilung auf den Versuchsflächen geben Abb. 4-31 und Tab. 4-7 weiter unten wieder.

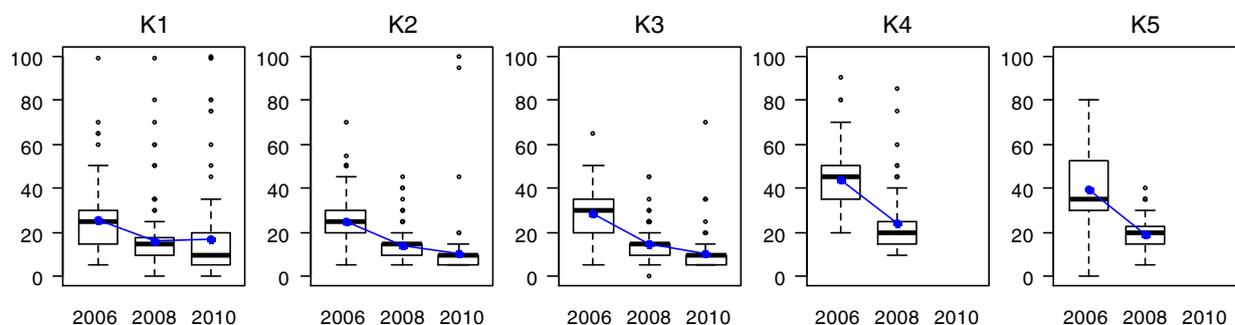


Abb. 4-31: Verteilung der prozentualen Laubverluste auf den Versuchsflächen des Kontinentalitätsgradienten vom Beginn (2006) bis zum Ende der Aufnahmen (2010 beziehungsweise 2008). Neben den Medianen in den Boxplots sind die arithmetischen Mittel für 2006, 2008 und (nur auf K1-K3) 2010 in blau dargestellt.

Der Vergleich von Anfangs- und Endzustand zeigt überall eine deutliche Erholung des Belaubungszustands an; auf den polnischen Flächen K4 und K5 liegen 2008 dennoch wie im Anfangsjahr 2006 etwas höhere Laubverlustniveaus vor. Hinsichtlich der Streuung der Werte ist überwiegend eine Verringerung im Beobachtungszeitraum zu erkennen.

Parallel zur Verbesserung des Kronenzustands nach der Sommeransprache hat sich auf K1 bis K5 im Beobachtungszeitraum auch die Kronenstruktur nach dem Anspracheschlüssel von KÖRVER et al. (1999) für den laublosen Winterzustand erholt. In die Ergebnisdarstellung (Tab. 4-7) ist das Jahr 2008 (beziehungsweise der Winter 2008/09) einbezogen, da mit diesem Jahr die Laubverlustansprachen auf K4 und K5 endeten. Die Verschiebungen in den Mittelwerten der Kronenstrukturstufen werden unterstrichen durch den grafischen Vergleich der KSt-Wert-Verteilungen auf den einzelnen Flächen und ihrer Veränderung von 2006 bis 2010 (Abb. 4-32; zum Stichprobenumfang siehe Tab. 4-8).

Tab. 4-7: Entwicklung der arithmetischen Flächenmittelwerte des prozentualen Laubverlusts (LbV) und der Kronenstrukturstufe (KSt) auf den Versuchsflächen des Kontinentalitätsgradienten. Die KSt-Werte beziehen sich auf den Winter, der in dem in der ersten Spalte genannten Jahr begann.

Jahr	K1		K2		K3		K4		K5	
	LbV	KSt								
2006	25,6 %	6,47	25,2 %	5,61	28,9 %	5,76	43,7 %	5,90	39,7 %	6,16
2008	16,0 %	5,91	14,2 %	5,01	14,8 %	5,71	24,0 %	5,77	19,3 %	5,82
2010	17,2 %	5,61	10,7 %	4,74	10,5 %	5,36	-	5,74	-	5,79

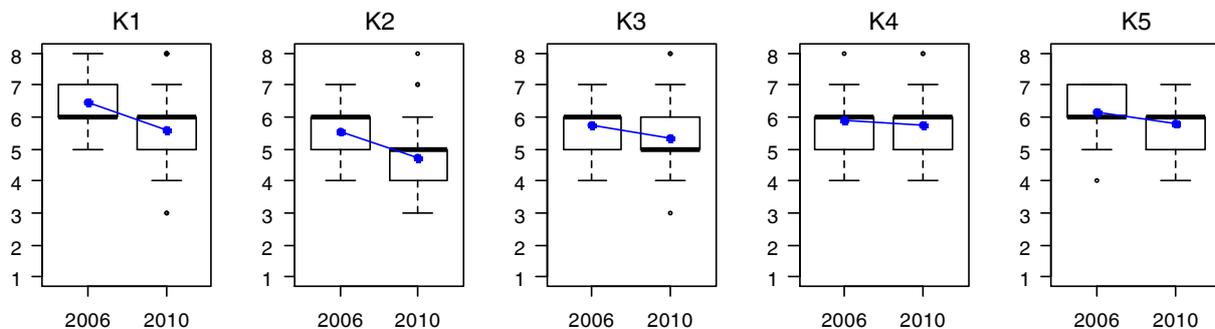


Abb. 4-32: Verteilung der Kronenstrukturstufen auf den Versuchsflächen des Kontinentalitätsgradienten vom Beginn (2006) bis zum Ende der Aufnahmen (2010). Neben den Medianen in den Boxplots sind die arithmetischen Mittel in blau dargestellt. Zum Stichprobenumfang siehe Tab. 4-8.

Auf Grund ihrer diskreten Verteilung und der geringen Zahl an Faktorausprägungen, die tatsächlich vorkommen, ist die Anwendung von t-Tests zur Prüfung von Mittelwertdifferenzen zwischen den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten auf die LbV- und KSt-Werte nur wenig sinnvoll. Die Abb. 4-33 stellt beispielhaft die Verteilung der Laubverlustwerte 2008 dar; es wird deutlich, dass von einer Normalverteilung der Daten nicht ausgegangen werden kann. Deshalb erfolgte die statistische Analyse der Kronenentwicklung mit Hilfe des nichtparametrischen WILCOXON-Tests zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ (WEISSTEIN

2011)¹. Hinsichtlich der LbV-Werte sind sich demnach 2006 nur die Flächen K1 und K2 ähnlich, alle anderen Flächen weisen jeweils individuell unterschiedliche Verteilungen beziehungsweise Mittelwerte der dort angesprochenen Laubverlustprozente auf. Durch eine deutliche Erholung von K3 sind 2008 bei Mittelwerten von 16,0, 14,2 und 14,8 % die drei deutschen Flächen im Grunde identisch, während die polnischen Flächen mit Werten von 24,0 und 19,3 % davon signifikant abweichen. Die westlichste Fläche K1 wiederum zeigt 2010 einen deutlich größeren mittleren Laubverlust als K2 und K3, wo sich die Erholung fortgesetzt hat. In allen Versuchsbeständen zeigte sich zusammengefasst eine signifikante Verbesserung der Anspruchswerte im Vergleich der Erstaufnahme mit 2008 und 2010, wenn auch in unterschiedlicher Stärke.

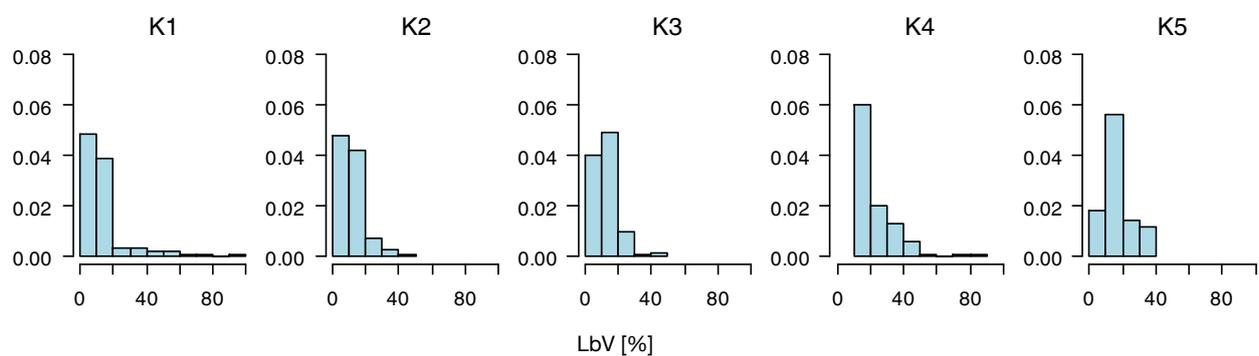


Abb. 4-33: Histogramme der Anspruchswerte zum prozentualen Laubverlust auf den Flächen K1-K5 2008.

Der Vergleich der mittleren Kronenstrukturstufe ergibt nach dem WILCOXON-Test zu Beginn der Erhebungen signifikante Unterschiede zwischen allen Flächen, die sich aber im Lauf der Zeit verringern, so dass sich 2008 die Verteilung auf K1 nicht mehr wesentlich von denen auf K3, K4 und K5 unterscheidet. 2010 wiederum bestehen keine signifikanten Differenzen zwischen K4 einerseits sowie K1 und K5 andererseits. Auf allen Flächen bis auf K4 haben sich die Kronenstrukturstufen zwischen 2006 und 2010 in Richtung geringerer Werte verändert, was auf eine Erholung der Kronenstruktur hindeutet.

Auf Zusatzflächen mit einem hinreichenden Alter der Eichen wurden während der Bohrkernentnahme ebenfalls die Kronenstrukturstufen angesprochen. Es handelt sich jedoch im Gegensatz zu den Kernflächen um eine einmalige Aufnahme mit entsprechend wenigen Faktorausprägungen. Die Spannweite der beobachteten Werte gibt Abb. 4-34 wieder. Zu beachten ist, dass die Aufnahmen für KS6133 vor der Vegetationsperiode (VP) 2007 stattfanden, für die Flächen in Fünfeichen ("FE") und Dubrow ("Dub") vor der VP 2008 und für HF5506 vor der VP 2009.

¹ WEISSTEIN, E. W.: Spearman Rank Correlation Coefficient / Wilcoxon Rank Sum Test. From "MathWorld – A Wolfram Web Resource", <http://mathworld.wolfram.com/SpearmanRankCorrelationCoefficient.html> beziehungsweise <http://mathworld.wolfram.com/WilcoxonRankSumTest.html> (16.08.2011)

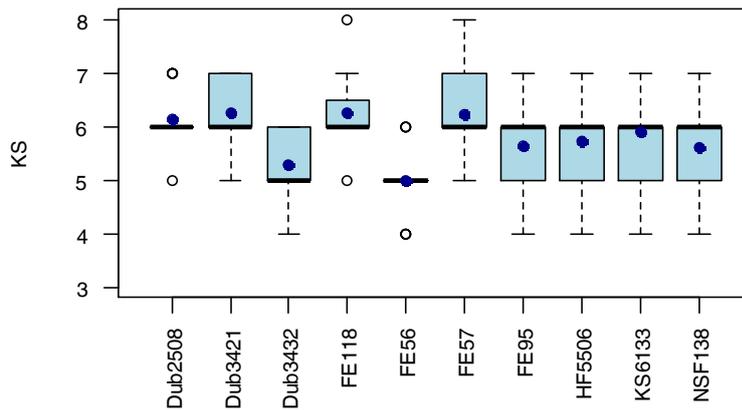


Abb. 4-34: Verteilung der Kronenstrukturstufen KS nach KÖRVER et al. (1999) auf den Zusatzflächen; die Punkte bezeichnen den arithmetischen Mittelwert. Angesprochen wurden jeweils die mit Bohrkernen beprobten Bäume, die zugrundeliegenden Stichprobengrößen enthält Abb. 4-38.

Zwischen den analysierten Kollektiven gibt es keine signifikanten Unterschiede; die Mittelwerte zwischen 6,3 und 5 liegen auf dem Niveau der Kernflächen. Die etwas schlechteren KSt-Werte auf FE57 korrespondieren mit dem dort zum Aufnahmezeitpunkt gegebenen sehr hohen Bestockungsgrad (rund 1,4) und den entsprechend kleinen Kronen. Aufschlüsse über mögliche Veränderungen werden turnusmäßige Wiederholungsaufnahmen der Zusatzflächen fünf Jahre nach Erstaufnahme bringen, die in den Jahren 2012-2014 erfolgen.

4.1.2 Beziehungen zwischen Kronenzustand, Zuwachs und Kronengröße

Die Beziehungen zwischen den Ergebnissen der Laubverlusteinschätzung im Sommer sowie der Kronenstrukturansprache im Winter auf den Flächen der Klima- beziehungsweise der Kontinentalitätssequenz stellen Abb. 4-35 und Tab. 4-8 dar. Da nur in den Jahren 2006-2008 beide Vitalitätsindikatoren auf allen Flächen erhoben wurden, erfolgt die Analyse auf Basis der Mittelwerte für diese Periode. Auf Grund der Parametereigenschaften (siehe oben) wird zur Prüfung des Zusammenhangs der Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN benutzt.

Tab. 4-8: Rangkorrelationskoeffizienten (R_{sp}) für die Beziehungen zwischen Laubverlust (LbV) und Kronenstruktur (KSt) anhand der Mittelwerte beider Parameter über die Jahre 2006-2008 sowie zum jährlichen relativen Grundflächenzuwachs 2002-2006 auf den Kernflächen (K1-K5).

		K1	K2	K3	K4	K5	K1-K5
	n	118	124	179	141	71	633
LbV vs. KSt	R_{sp}	0,404	0,437	0,471	0,528	0,594	0,480
	α	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
LbV vs. iG_{rel}	R_{sp}	-0,283	-0,037	-0,185	-0,382	-0,193	-0,023
	α	0,002	0,684	0,013	0,000	0,106	0,571
KSt vs. iG_{rel}	R_{sp}	-0,221	-0,307	-0,334	-0,330	-0,076	-0,162
	α	0,016	0,000	0,000	0,000	0,527	0,000

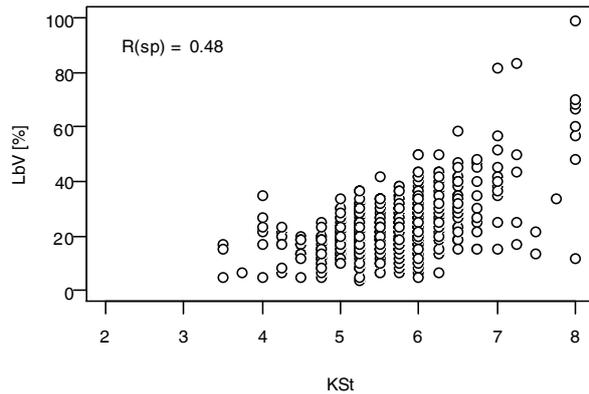


Abb. 4-35: Beziehung zwischen Laubverlust (LbV) und Kronenstrukturstufe (KSt) als Mittelwerte der Jahre 2006-2008 für die Trauben-Eichen des herrschenden Bestands auf den Klimasequenzflächen (n = 641). Angegeben ist der Rang-Korrelationskoeffizient $R(sp)$ des statistischen Zusammenhangs.

Wie zu erwarten war, ist der Rangkorrelationskoeffizient auf allen Flächen und auch in deren Zusammenfassung hochsignifikant (Tab. 4-8, Seite 101). In der Abb. 4-35 wird jedoch auch die enorme Streuung der Parameter deutlich, die sich zum Beispiel darin äußert, dass Bäume mit der schlechtesten KSt-Stufe 8 mittlere Lbv-Werte von 17 - 99 % aufweisen. Umgekehrt kann ein mittlerer Lbv von etwa 25 % sowohl bei einer durchschnittlichen KSt von 4 als auch im "Grobaststadium" bei einer mittleren KSt von 6,7 auftreten.

Der relative Grundflächenzuwachs (iG_{rel} ; Mittelwert des Zeitraums 2002-2006) steht nach der Datenauswertung in einem nur schwachen Zusammenhang mit den Vitalitätsparametern. Es ergeben sich auf allen Flächen nur relativ geringe Rang-Korrelationen, die jedoch in den meisten Fällen sowohl für LbV als auch für KSt statistisch signifikant sind (Tab. 4-8). Ausnahmen sind die Fläche K5 hinsichtlich beider Vitalitätsparameter sowie die Fläche K2 in Bezug auf LbV. Die Zusammenfassung aller Daten erzeugt Rangkorrelationskoeffizienten von -0,02 (iG_{rel} vs. LbV, nicht signifikant) beziehungsweise -0,16 (iG_{rel} vs. KSt, statistisch signifikant). Kombiniert man beide Kronenvariablen in einem linearen Regressionsmodell für iG_{rel} , so ergibt sich ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von nur $R^2_{adj} = 0,05$. Der Parameter LbV ist dabei nicht signifikant beteiligt, für KSt beträgt der Koeffizient -0,463 bei einem p -Wert von 0,018. Auch zur Erklärung des *absoluten* Kreisflächenzuwachses trägt KSt signifikant bei ($p = 0,026$), von dominierender Bedeutung ist jedoch die Ausgangskreisfläche ($p = 0,000$) mit einem korrigierten Bestimmtheitsmaß des Gesamtmodells von $R^2_{adj} = 0,28^1$.

Die relative Kronenschirmfläche KF_{rel} ist auf den Kernflächen 2006 an einer Stichprobe von jeweils etwa 30 Trauben-Eichen erhoben worden (siehe 3.3). Bei 147 Bäumen liegen gleichzeitig auch Werte für die Vitalitätsparameter vor. Beide Variablen sind mit KF_{rel} statistisch signifikant korreliert, wobei dieser Zusammenhang für den Laubverlust etwas schwächer ausgeprägt ist ($R_{sp} = -0,19$) als für die Kronenstruktur ($R_{sp} = -0,25$). Eine graphische Darstellung der Beziehungen enthält Abb. 4-36.

¹ Ein lineares Regressionsmodell ist in diesem Fall jedoch nicht zulässig, weil nicht alle Variablen metrisch skaliert sind beziehungsweise stetigen Charakter haben noch deren Homoskedastizität gewährleistet ist. Die Darstellung soll nur einen Eindruck von der Variabilität der Zusammenhänge vermitteln.

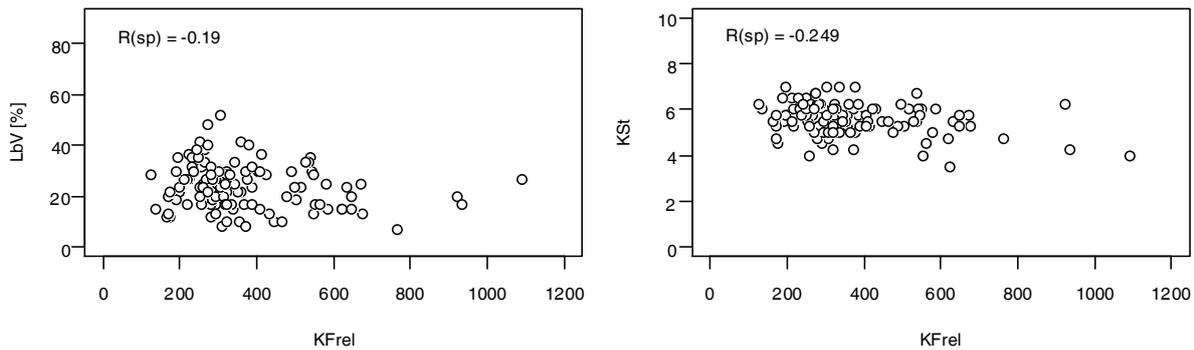


Abb. 4-36: Beziehung zwischen relativer Kronenschirmfläche KF_{rel} und dem prozentualen Laubverlust LbV (links) sowie der Kronenstrukturstufe (KSt) als Mittelwerte der Jahre 2006-2008 für ausgewählte Traubeneichen auf den Kernflächen ($n = 147$). Angegeben ist der Rang-Korrelationskoeffizient $R(sp)$ des statistischen Zusammenhangs.

Die Beziehung zwischen Kronenschirmfläche (KF) und Zuwachs wurde entsprechend des signifikanten Einflusses der Kreisfläche auf beide Parameter ($R = 0,77$ für die KF ; $R = 0,62$ für den jährlichen Kreisflächenzuwachs) durch partielle Korrelation mit der Kreisfläche von 2006 als Kontrollvariabler geprüft (siehe 3.4.4). Es ergibt sich ein partieller Korrelationskoeffizient von $R_p = 0,17$ für den dimensionsbereinigten Zusammenhang zwischen KF und Zuwachs, der mit $p = 0,034$ als statistisch signifikant zu werten ist (Abb. 4-37).

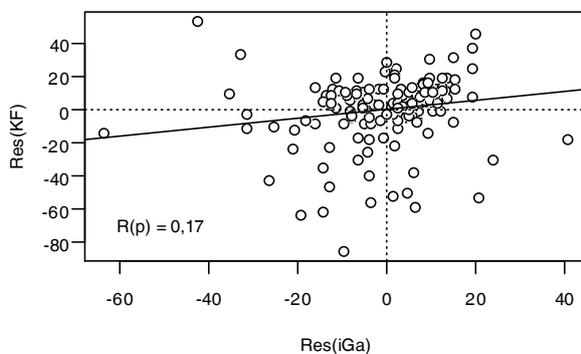


Abb. 4-37: Partielle Korrelation zwischen Kronenschirmfläche KF und jährlichem Kreisflächenzuwachs iGa mit der Ausgangskreisfläche als Kontrollvariabler. Das Diagramm stellt die Residuen (Res) zum linearen Modell der beiden Parameter mit jeweils der Kreisfläche als Prädiktor dar. Zusätzlich ist der lineare Ausgleich des statistischen Zusammenhangs mit dem partiellen Korrelationskoeffizienten $R(p)$ angegeben.

4.1.3 Mortalität

Die jährlichen Erhebungen der Kronenzustandsparameter ermöglichten es in Kombination mit ihrer gründlichen Erstaufnahme, die im Untersuchungszeitraum aufgetretene natürliche Mortalität zu quantifizieren. Dazu zählen alle Bäume, die 2006 noch als lebend angesprochen wurden, im Laufe der folgenden fünf Jahre dann jedoch abgestorben sind. Die Ursachen für dieses Ausscheiden konnten – bis auf Windwürfe und -brüche – mangels eingehenderer Prüfung meist nicht eindeutig bestimmt werden. Zwischen den Kernflächen bestehen Unterschiede im mittleren Durchmesser des ausgeschiedenen Bestandes, die sich

auf die von der Nutzungsgeschichte bestimmten Bestockungsstruktur und -dichte zurückführen lassen. Der Sturm "Kyrill" als abiotisches Extremereignis am 18.01.2007 schädigte fast ausschließlich die Fläche K4, wo neben sechs Eichen auch zehn Wald-Kiefern geworfen oder gebrochen wurden. Auf K1 verursachte "Kyrill" nur Schäden an einigen beigemischten Kiefern, die anderen Flächen waren nicht betroffen. Die gesamte natürliche Mortalität ist in Tab. 4-9 zusammengefasst¹.

Tab. 4-9: Durch natürliche Mortalität 2006-2011 ausgeschiedene Trauben-Eichen auf den Kernflächen

	"Klassisch"	Pilz	Sturm	"Unklar"	Gesamt	Gesamt-%
K1	4	1	-	3	8	6,5
K2	2	1	-	-	3	2,3
K3	5	-	-	13	18	6,3
K4	-	-	6	-	6	3,9
K5	1	-	-	-	1	0,8
Gesamt	12	2	6	16	36	4,4

Erklärungen der Spaltenköpfe weiter unten im Text

Die Kategorien der Mortalität in Tab. 4-9 repräsentieren zum Teil ("Sturm") die während der regelmäßigen Aufnahmen erkennbaren Ursachen, zum Teil wurde nur gruppiert in Absterben nach deutlichen Symptomen der Eichenkomplexkrankheit ("Klassisch"; EISENHAUER 1991; DESPREZ-LOUSTAU et al. 2006) und Absterben nach abweichendem Verlauf beziehungsweise unklaren Ursachen ("Unklar"). Während die "klassische" Gruppe vergleichsweise alte und oberständige Bäume auch aus dem herrschenden Bestand umfasst, sind die meisten Bäume mit unklaren Mortalitätsursachen unterdrückte, zurückbleibende Bäume mit deutlich geringeren Durchmesser. Deren Absterben ist höchstwahrscheinlich auf ihren von den dominierenden Bäumen stark eingeschränkten Ressourcenzugang zurückzuführen. Die beiden durch "Pilz" ausgeschiedenen Eichen sind in den Beobachtungsjahren – wahrscheinlich durch Winddruck – abgebrochen an Stellen, an denen Pilzkonsolen zu sehen waren, nachdem sie bis dahin grüne Kronen zeigten.

Auf Grund der unterschiedlich langen Zeiträume, die dem Absterben je nach Ursachenkombination vorausgehen können (Kapitel 2.2.2, Seite 17), ist davon auszugehen, dass für einige der 2006-2011 ausgeschiedenen Bäume die "Todesspirale" nach MANION (1981; vergleiche Abb. 2-6) bereits vorher begonnen hat. Ebenso ist damit zu rechnen, dass ein Teil der heute als "lebend" angesprochenen Individuen, besonders aus der Gruppe mit extrem schlechten Kronenzustandswerten, in den kommenden Jahren absterben wird. Bei der Interpretation der Zahlen sind weiterhin die voneinander abweichenden Durchmesser- und Altersverteilungen der einzelnen Flächen zu beachten (siehe Tab. 3-1).

¹ Die in Tab. 4-9 aufgeführten Bäume sind nicht die einzigen, die im Untersuchungszeitraum ausgeschieden sind. Versuchsbedingte Eingriffe wie die Entnahme von Bäumen zur Stammanalyse, die sich nicht außerhalb der Versuchsfläche durchführen ließen, führten vereinzelt zusätzlich zu einer Verringerung der Stammzahl, die jedoch deutlich unter der natürlichen Mortalität liegt.

4.2 Zuwachsverhalten

4.2.1 Evaluierung der Stichprobenzahlen, Zeit- und Altersspannen

Den Chronologien liegen unterschiedliche Probebaumzahlen auf den einzelnen Flächen zu Grunde, die in Bezug auf die dendroökologischen Auswertungen als Stichprobenumfang im engeren Sinne zu betrachten sind. Nicht von allen Bäumen, denen Bohrkerne entnommen wurden, gingen schließlich die Einzelbaum-Zuwachszeitreihen auch in die Bestandeschronologie ein (zur Methodik der Ausreißerprüfung siehe Abschnitt 3.3.1). Einen Überblick zu den entsprechenden Zahlen je Versuchsfläche sowie – auf den Kernflächen – je Sozialklasse gibt Abb. 4-38. Die weißen Bereiche bezeichnen diejenigen Bäume, die bei der Chronologierstellung nicht verwendet wurden.

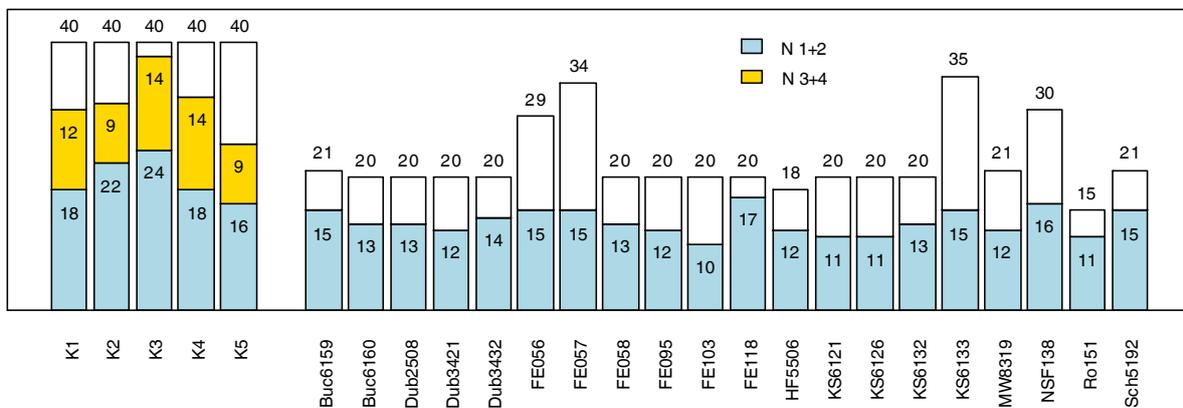


Abb. 4-38: Stichprobenzahlen bei der Bohrkerntentnahme und der weiteren Auswertung des Radialzuwachses mit der Gesamtzahl der durch (je zwei) Bohrkerne beprobten Bäume (oberste Zahlenreihe). Angegeben ist auch die Anzahl der zur Chronologierstellung für den herrschenden (N 1+2) sowie für den beherrschten (N 3+4) Bestand herangezogenen Bäume.

Auf Grund des unterschiedlichen Alters der untersuchten Eichenkollektive wird der Analysezeitraum durch verschieden hohe Stichprobenzahlen abgedeckt (als Stichprobe gilt hier eine einzelne Bestandes-Chronologie). Einzelne beprobte Alteichen besonders auf den Kernflächen K1 und K2 erlauben Rekonstruktionen des Zuwachsverlaufes bis in das Ende des achtzehnten Jahrhunderts zurück, ausreichende Probebaumzahlen ergeben sich aber erst für die Zeit ab etwa 1865. Die für 20 Zusatzflächen erstellten Chronologien mit 28 (Zusatzfläche Rochau 151) bis 148 Jahren Länge reichen maximal bis ins Jahr 1860 (Zusatzfläche Neusorgefeld 138) zurück. Die Abdeckung des Untersuchungszeitraums durch Chronologien stellt die Abb. 4-39 dar.

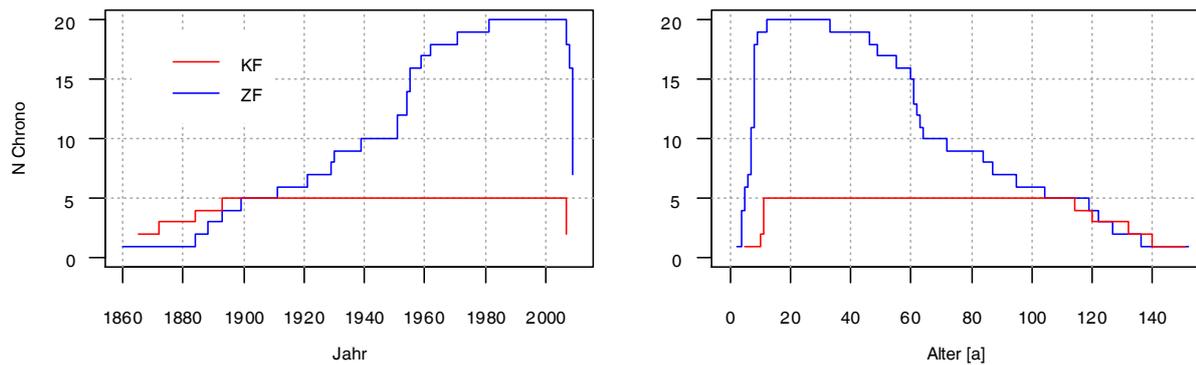


Abb. 4-39: Anzahl (N Chrono) der im Untersuchungszeitraum zur Verfügung stehenden Bestandes-Chronologien der Jahrringbreite auf Basis der Eichenbestände der Kern- und Zusatzflächen (KF bzw. ZF). Altersangaben entsprechen der mittleren Anzahl der Jahrringe auf Brusthöhe (1,3 m) je Stichprobenkollektiv. Streng genommen liegen für die KF je zwei Chronologien vor, nämlich für den herrschenden und den beherrschten Bestand.

4.2.2 Durchmesserentwicklung und Jahrringbreiten

Das Wuchsverhalten der Bestände auf den Versuchsfelder wurde retrospektiv aus den Bohrkernanalysen hergeleitet. Zur vergleichenden Betrachtung mit Bezug auf das Alter dienten dabei Stichproben aus dem herrschenden Bestand (Baumklassen 1 und 2 nach KRAFT 1884). Dies entsprach dem Ziel, die langfristige mittlere Entwicklung mit möglichst wenig "Rauschen" rekonstruieren zu können (vgl. 2.3.3). Die Herleitung des mittleren Radialzuwachses geht von den gemessenen Jahrringbreiten aus, die zur mittleren relativen BHD-Entwicklung transformiert werden (BECK 2007)¹. Die Multiplikation dieser relativen Durchmesser mit dem Grundflächenmitteldurchmesser der Stichprobe ergibt dann die mittlere BHD-Entwicklung im beprobten Kollektiv, aus dem wiederum die mittleren Radialzuwächse in den einzelnen Trauben-Eichen-Beständen abgeleitet werden können. Die Abdeckung der entsprechenden Spannweiten durch Stichproben (Bestände) und Probebäume stellen Abb. 4-38 und Abb. 4-39 dar. Für altersbezogene Auswertungen wurden die bestandesweisen arithmetischen Mittel der individuell meist uneinheitlichen Alterswerte verwendet, wie sie sich aus den Bohrkernauswertungen ergaben.

In den Beständen auf den Versuchsfelder der Klimasequenz ist die Trauben-Eiche zusammen mit der Kiefer in der herrschenden Schicht vertreten. Für diese Bestände stellt Abb. 4-40 die mit der oben beschriebenen Methode hergeleiteten Jahrringbreiten sowie die Entwicklung des mittleren BHD der Stichproben über dem Alter dar. Als Vergleichsbezug geben die Diagramme auch die Werte für die Entwicklung des Grundflächenmitteldurchmessers des verbleibenden Bestands in der ersten Ertragsklasse der Ertragstafel nach ER-

¹ Wie in 2.3.3 und Abb. 2-12 beschrieben, ergibt sich aus der Summe der aus einer Bohrkernanalyse ermittelten und korrigierten Jahrringbreiten der Durchmesser ohne Rinde eines Baumes. Die kumulierten relativen Jahrringbreiten zu einem Zeitpunkt entsprechen dann dem relativen Durchmesser ohne Rinde im betreffenden Jahr. Bezieht man diese Relativwerte auf den Durchmesser mit Rinde, erhält man die Entwicklung des relativen BHD.

TELD (1963) wieder¹. Beim Vergleich zwischen Tafelverläufen und Bohrkernauswertungen sind die unterschiedlichen Bezugskollektive zu berücksichtigen: Die Ertragstafel gibt das Mittel für den gesamten verbleibenden Bestand an, die für diese Auswertung herangezogenen Stichproben erfassen vor allem den herrschenden Bestand. Es wäre zwar möglich, die *relative* Entwicklung der mittleren Jahrringbreite im herrschenden Bestand (als Prozentwerte vom Enddurchmesser) auf den Mitteldurchmesser des Gesamtbestands der beprobten Flächen zu übertragen. Damit könnte man einen direkteren Vergleich mit der Ertragstafel anstellen. Da es hier jedoch vorrangig um die zeitliche Entwicklung und nicht um die absoluten Werte von Jahrringbreiten und Brusthöhendurchmesser geht, wurde von diesem Schritt abgesehen.

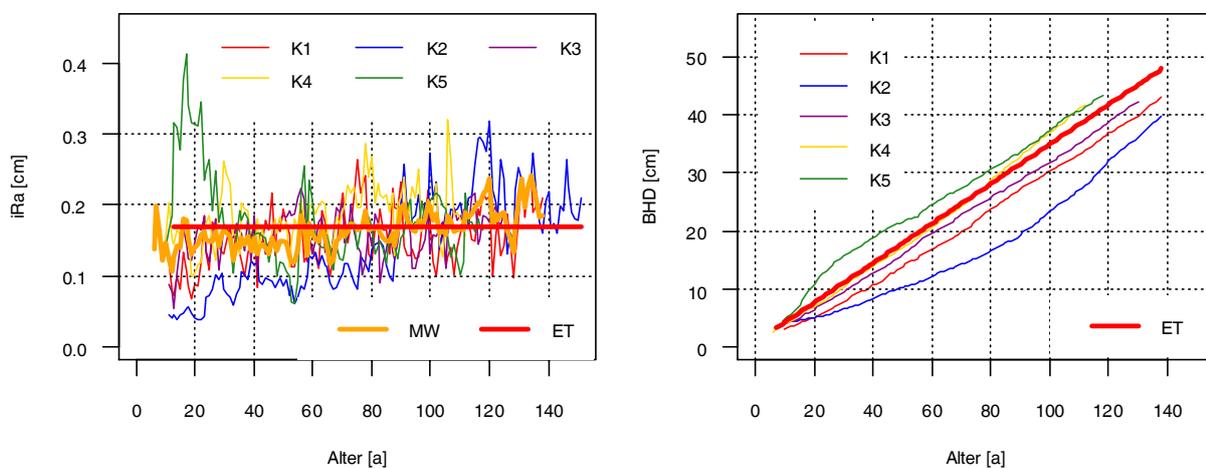


Abb. 4-40: Jährlicher Radialzuwachs (iRa mit Rinde, links) und Entwicklung des BHD über der Zeit für die Flächen K1 bis K5 (einschließlich mittlerem Verlauf über alle Flächen "MW") im Vergleich mit dem Grundflächenmittelstamm des verbleibenden Bestandes, erste Ertragsklasse, nach der Ertragstafel ERTELD (1963) ("ET").

Da auf vielen Zusatzflächen die Trauben-Eiche als zweite Bestandesschicht unter einem Altholzschirm der Kiefer steht, handelt es sich dort um "relative" Stammklassen der Eiche innerhalb des in Bezug auf den gesamten Bestand soziologisch nicht herrschenden Unter- oder Zwischenstands. Von diesen relativen Stammklassen wurde ebenso wie im Hauptbestand auf den ältesten Zusatzflächen vor allem der herrschende Bereich beprobt und dieses Kollektiv zur Herleitung des Radialzuwachses und der BHD-Entwicklung herangezogen (Abb. 4-41). Wie bei Betrachtung der Klimasequenzflächen sollen auch für die Zusatzflächen im Vergleich mit der Ertragstafel vor allem die Trends über der Zeit im Fokus stehen und nur in zweiter Linie die absoluten Maße.

¹ Bei der Vorstellung seiner Ertragstafel wies ERTELD (1962) darauf hin, dass der "Durchmesserzuwachs des Bestandesmittelstammes einer Funktion 1. Grades folgt, wenn man die Ausgleichskurven vieler Bestände berechnet". Er sprach sich dafür aus, die waldbauliche Behandlung an der Maßgabe stetig gleichmäßigen Zuwachses auszurichten; die in Abb. 4-40 und Abb. 4-41 sichtbaren Geraden sind das Resultat dieser Zielvorgabe.

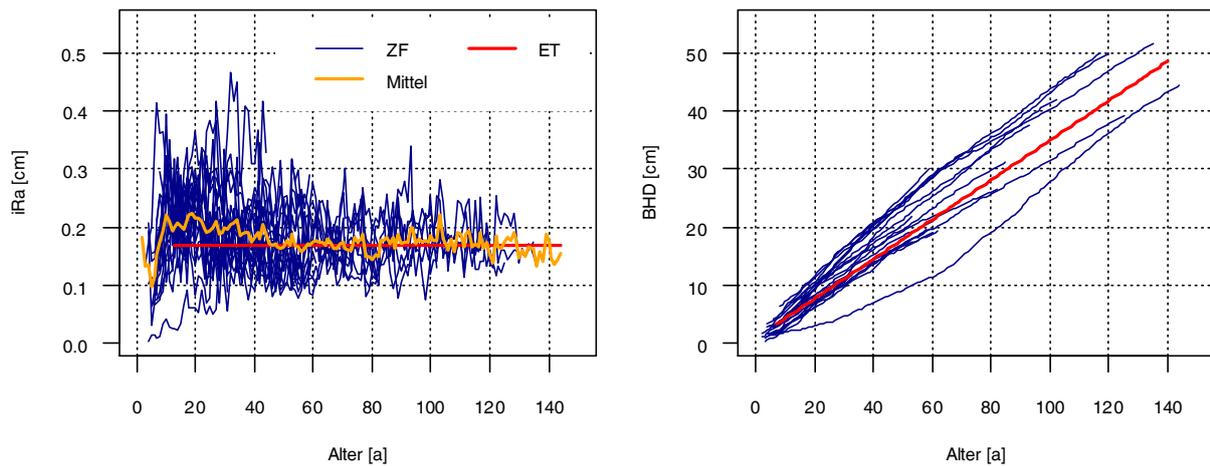


Abb. 4-41: Entwicklung des jährlichen Radialzuwachses (iRa mit Rinde, links) und des Brusthöhendurchmessers (BHD) über dem Alter für Trauben-Eiche auf 20 Zusatzflächen (vgl. 3.1.1). Die Einzelkurven stellen den mittleren Verlauf einer Stichprobe ($n \approx 15$) aus dem herrschenden Bestand dar. Zum Vergleich ist der Verlauf für den Grundflächenmittelstamm nach der Ertragstafel ERTELD (1963), erste Ertragsklasse (ET), angegeben.

Die Entwicklung des mittleren Brusthöhendurchmessers auf den Zusatzflächen zeigt relativ ähnliche, geradlinige Muster, die fast durchgängig über dem von der Ertragstafel (ERTELD 1963) beschriebenen Verlauf liegen (Abb. 4-41 rechts). Auffällig ist eine Kurve mit sehr zögerlichem, schwachwüchsigem Beginn, die erst ab einem Alter von etwa 60 Jahren die Zuwachsraten der anderen Bestände erreicht und dadurch durchgängig das Schlusslicht der Durchmesserentwicklung bildet. Es handelt sich um die älteste Zusatzfläche NSF138 in der Rochauer Heide. Der Bestand ist insofern untypisch, als dort sehr wahrscheinlich Reparationshiebe nach dem zweiten Weltkrieg die ursprünglich vorherrschenden Eichen entnommen haben und bis dahin unterdrückte Bäume in den Hauptbestand einwuchsen (vergleiche Abschnitt 3.1.3, Seite 64).

Die Entwicklung der Jahrringbreite (als zentraler Parameter der Witterungs-Zuwachs-Analysen) über der Zeit ist für Kern- und Zusatzflächen in Abb. 4-42 dargestellt, zur besseren Übersichtlichkeit nur im Zeitraum seit 1900.

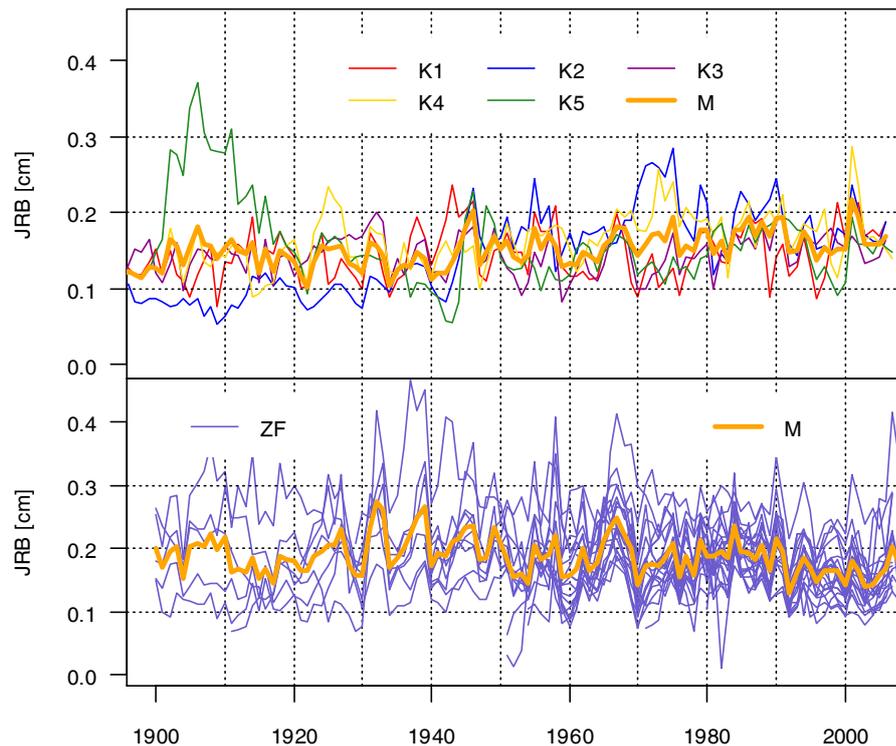


Abb. 4-42: Jahringbreitenentwicklung auf den Kern- (oben) und den Zusatzflächen (ZF). Der Verlauf des arithmetischen Mittels der Versuchsflächen (M) ist jeweils orange-farben hervorgehoben. Für die Kernflächen sind die Mittelkurven der Stichprobe der herrschenden Bestands dargestellt (Sozialklasse 1+2).

Der mit dem Alter zunehmende Radialzuwachs auf den Kernflächen bestätigt sich auch bei der Betrachtung über dem Kalenderjahr – bis auf K5 verläuft die Entwicklung sehr ähnlich mit zur Gegenwart hin steigenden Zuwachswerten. Im Unterschied zu den hier gleichaltrigen Beimischungen der Kiefer sind vor allem auf den jüngeren Zusatzflächen die Eichen meist deutlich jünger als die Kiefern und stehen dementsprechend unter Konkurrenzdruck. Dies verursacht wenigstens zum Teil den in Abb. 4-42 unten sichtbaren leicht fallenden Trend des mittleren Radialzuwachses in der zweiten Hälfte des Betrachtungszeitraums.

4.2.3 Periodischer Radial- und Kreisflächenzuwachs

Die Quantifizierung des Radial- und Kreisflächenzuwachses erfolgt für den Zeitraum 2002-2006 auf Basis der mit Bohrkernen beprobten Trauben-Eichen auf den Kern- und Zusatzflächen (zu den Stichprobenumfängen siehe Abb. 4-38, Bäume beider Sozialklassen wurden zur Analyse zusammengefasst). Für K1-K5 sind außerdem die BHD aller Bäume fünf Jahre nach der Erstaufnahme erneut gemessen worden, damit kann zusätzlich die Periode 2006-2010 ausgewertet werden. Zur Vergleichbarkeit mit Ertragstafelaussagen und anderen waldwachstumskundlichen Untersuchungen sind die Ergebnisse auf Basis des BHD mit Rinde angegeben. In der folgenden Abb. 4-43 werden zuerst die mittleren jährlichen Kreisflächenzuwächse für 2002-2006 auf den Kernflächen im Vergleich mit der Periode 2006-2010 dargestellt, danach die Zusammenfassungen über K1-K5 sowie über die Zusatzflächen.

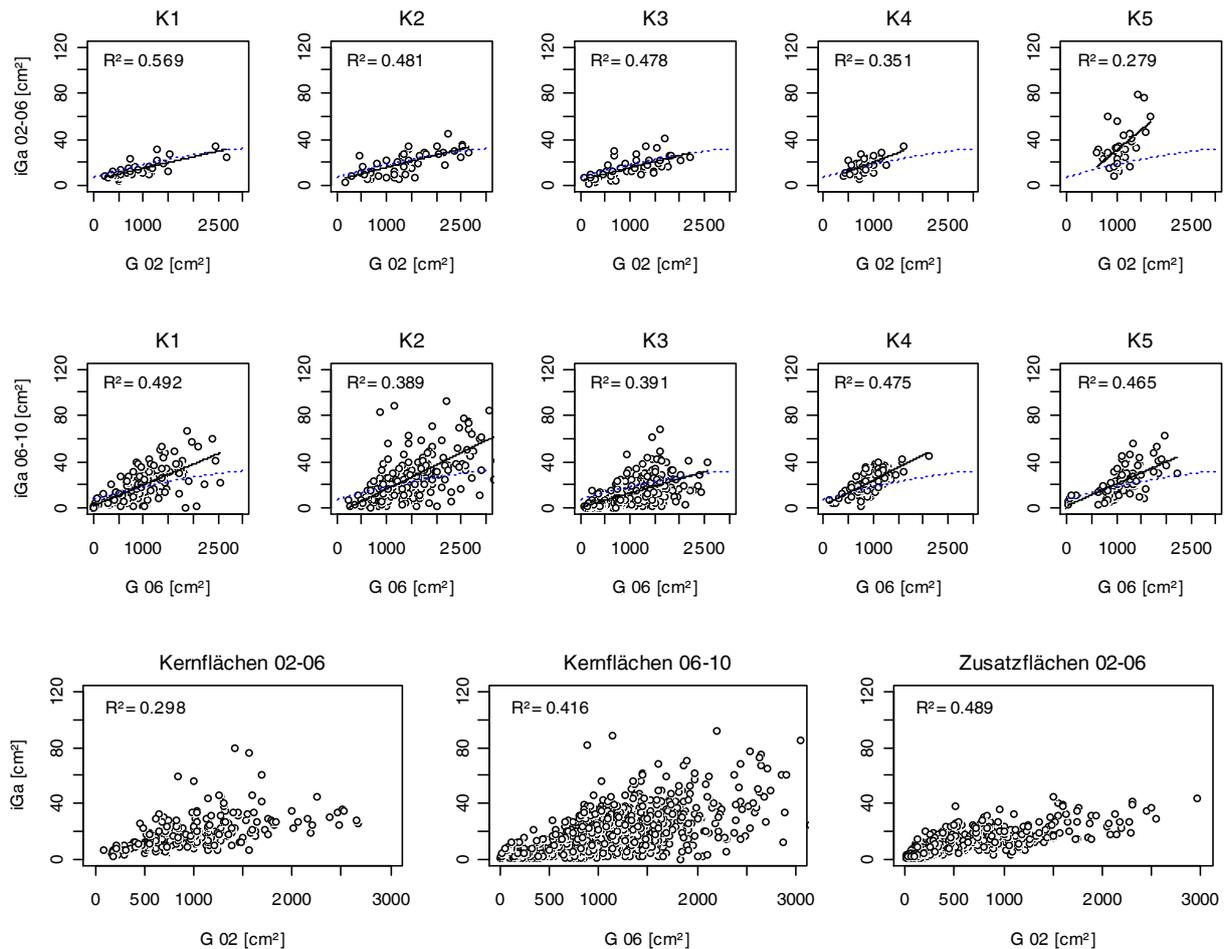


Abb. 4-43: Beziehungen zwischen Ausgangskreisfläche G02 (beziehungsweise G06) mit Rinde und mittlerem jährlichem Kreisflächenzuwachs iGa für die Kernflächen 2002-2006 (Bohrkernproben; oben), 2006-2010 (alle Bäume; Mitte) und für die Zusatzflächen 2002-2006 (Bohrkernproben, rechts). Zusätzlich dargestellt sind als durchgezogene Geraden die linearen Ausgleichsfunktionen mit deren quadrierten Korrelationskoeffizienten sowie die Werte für den Zuwachs des Grundflächenmittelstamms der höchsten Ertragsklasse der Tafel nach ERTELD (1963) im Altersbereich 80-200 Jahre als blaue unterbrochene Kurve.

Die Korrelationen zwischen Radialzuwachs und Ausgangsradius waren auf den Kernflächen deutlich niedriger als die in Abb. 4-43 dargestellten Werte für den Kreisflächenzuwachs über der Ausgangskreisfläche (siehe Tab. 4-10). Im Zeitraum 2002-2006 bestanden bei Einzelbetrachtung auf keiner der Flächen statistisch signifikante lineare Zusammenhänge, nur bei Zusammenfassung aller Flächen ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,078$ mit $\alpha = 0,000$. In der Periode 2006-2010 sind die Korrelationen straffer und meist hochsignifikant, auch bedingt durch den höheren Stichprobenumfang. Tab. 4-10 stellt die Ergebnisse der Zuwachsanalysen für die verschiedenen Kollektive und Bezugsperioden zusammen.

Tab. 4-10: Mittlerer jährlicher Durchmesser- (iD) und Kreisflächenzuwachs (iG) der Perioden 2002-2006 (02) sowie 2006-2010 (06) der Trauben-Eichen auf den Kernflächen einzeln (K1-K5) und in Summe (KF) sowie auf den Zusatzflächen ZF im Vergleich mit den Werten der Ertragstafel ET.

	N_{02}^1	dg ₀₂ [cm]	iD ₀₂ [cm/a]	R ² _{D02}	iG ₀₂ [cm ² /a]	R ² _{G02}	N_{06} [N/ha]	dg ₀₆ [cm]	iD ₀₆ [cm/a]	R ² _{D06}	iG ₀₆ [cm ² /a]	R ² _{G06}
K1	40	34,2	0,27	<i>0,067</i>	14,3	0,569	216	30,1	0,30	0,237	13,5	0,492
K2	46	41,5	0,30	<i>0,053</i>	19,6	0,481	215	43,2	0,37	0,183	26,2	0,389
K3	53	35,6	0,28	<i>0,046</i>	15,5	0,478	282	34,6	0,22	0,230	12,2	0,391
K4	39	31,5	0,33	<i>0,047</i>	17,0	0,351	146	34,5	0,41	0,163	22,8	0,475
K5	35	38,3	0,55	<i>0,044</i>	34,6	0,279	111	36,6	0,38	<i>0,023</i>	21,6	0,465
KF	213	36,5	0,34	0,078	19,6	0,298	948	36,0	0,32	0,172	18,2	0,416
ZF	462	28,5	0,28	0,059	11,9	0,489						
ET		39,0	0,34		21,3							

ET = Werte der Ertragstafel nach ERTELD (1963) für den dg des verbleibenden Bestands, mäßige Hochdurchforstung, erste Ertragsklasse, Alter 120 Jahre. Die Zuwachswerte iD und iG sind auf den BHD des Grundflächenmittelstammes (dg) der einzelnen Kollektive bezogen. Die Bestimmtheitsmaße R² bezeichnen den statistischen Zusammenhang zwischen Ausgangsdurchmesser und Durchmesserzuwachs (R²_D) beziehungsweise zwischen Ausgangskreisfläche und Kreisflächenzuwachs (R²_G), sie sind *kursiv* gesetzt bei $\alpha \geq 0,05$, einfach bei $0,05 > \alpha \geq 0,001$ und **fett** bei $\alpha < 0,001$.

¹ Abweichungen zu den Zahlen aus Abb. 4-39 ergeben sich durch Integration von Bohrkernproben, die vom Autoren für Dichteuntersuchungen im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Dresden (BAUMUNG 2010) an zusätzlichen Bäumen des herrschenden Bestandes genommen und hier nur für die Zuwachsuntersuchungen genutzt wurden.

Vergleiche der einzelnen Flächen belegen 2002-2006 auf den Kernflächen höhere Zuwächse als auf den Zusatzflächen. Der Bezug auf die Ertragstafel ist wegen des Mischbestandscharakters aller Versuchsflächen (bis auf FE57) nur auf Basis des Grundflächenmittelstammes sinnvoll, einschränkend ist weiterhin das unterschiedliche Pflegeregime in tafelkonformen Rein- im Kontrast zu den untersuchten Mischbeständen zu berücksichtigen. Auch die auf vielen Flächen inhomogene Altersstruktur und die entsprechend breiten Durchmesserspannen, die aus der Entstehung der Eichenpopulationen aus Naturverjüngung resultieren, erschweren die Vergleichbarkeit der Wuchsleistungen mit Tafelwerten (zur Bestandesgeschichte siehe 3.1.3). Da dieser Vergleich nicht im Mittelpunkt der Arbeit steht, soll es bei diesen eher deskriptiven Ausführungen bleiben.

4.2.4 Autokorrelation und Sensitivität der Jahrringbreiten-Zeitreihen

Zur Auswertung des Zuwachsverhaltens in der Vergangenheit werden die Wirkungen vergangenen Wachstums auf die Jahrringbreiten (JRB) sowie das Ausmaß der interannuellen Variation auf der Ebene des mittleren Verlaufs der einzelnen Stichproben analysiert (siehe 3.3.2). Auf den Kernflächen wird auch hier zwischen dem herrschenden und dem beherrschten Bestand differenziert. Die Auswertung zeigt, dass auf allen Kernflächen signifikant positive Werte für die Autokorrelation erster Ordnung (AK1, vergleiche Formel 3-9) vorliegen (Tab. 4-11). Darüber hinaus bestehen auch zwischen den aktuellen JRB und den Werten weiter zurück liegender Jahre deutliche Abhängigkeiten, vor allem auf den Flächen K2 und K5. Herrschender und beherrschter Bestand (siehe 3.1.4, Seite 66) unterscheiden

sich dabei nicht. Im Extremfall (Sozialklasse 1+2 auf K2) ist die JRB im Jahr t noch mit der des Jahres $t-29$ signifikant korreliert. Abb. 4-44 stellt die Autokorrelationskoeffizienten der JRB-Zeitreihen für die Zeit seit 1900 dar. Auf der Abszisse ist das "Lag" dargestellt, also der Abstand zwischen den Jahren, deren Beziehung jeweils geprüft wird.

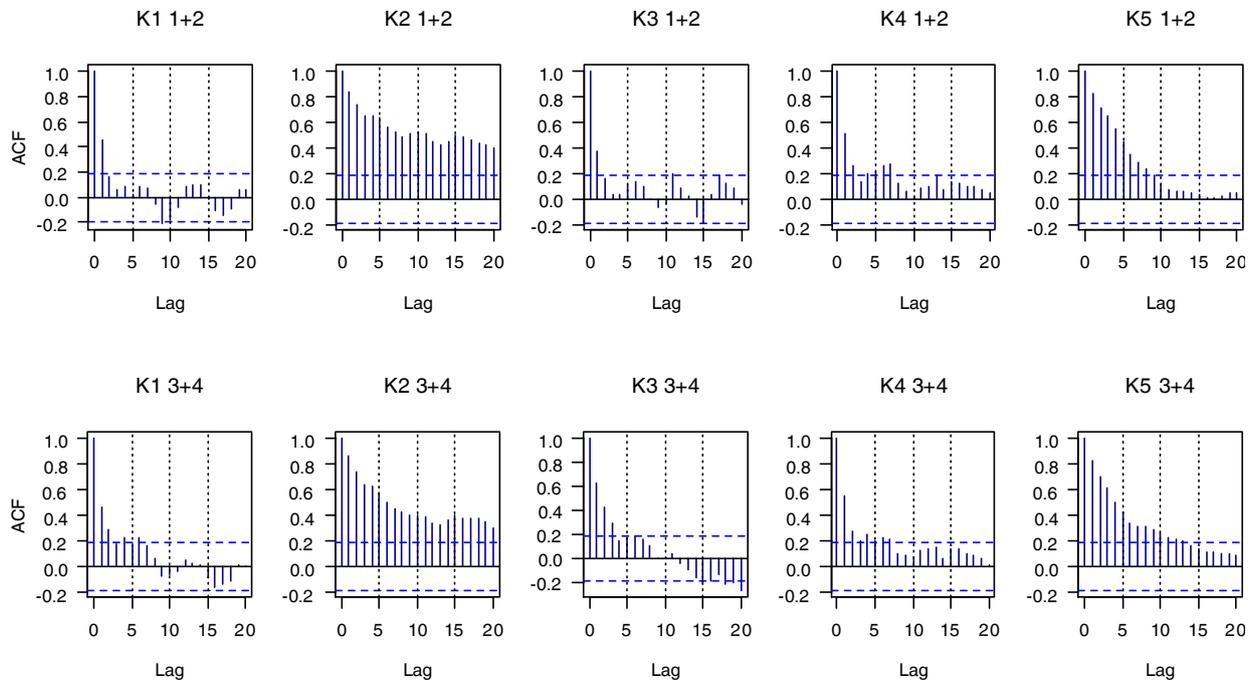


Abb. 4-44: Autokorrelationskoeffizienten (ACF) für die Zeitreihen der Jahrringbreite von den Kernflächen, getrennt nach Sozialklassen, dargestellt für Lags (Zeitverschiebungen) von 0 bis 20 Jahren. Die waagerechten gestrichelten Linien bezeichnen die Signifikanzschwellen.

Tab. 4-11: Autokorrelation erster Ordnung (AK1) berechnet für verschiedene Zeiträume sowie als Mittel (m) mit Standardabweichung (s) für gleitende 21-Jahres-Intervalle (AK1₂₁) für die Bohrkern-Stichproben aus den Eichenpopulationen der Kernflächen, unterteilt nach Sozialklassen. Werte mit gleichen Indexbuchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

	K1		K2		K3		K4		K5	
	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4
AK1 gesamt	0,68	0,64	0,90	0,89	0,64	0,66	0,52	0,55	0,82	0,83
1900-2006	0,46	0,47	0,85	0,87	0,38	0,62	0,52	0,55	0,82	0,83
1900-1950	0,43	0,47	0,84	0,85	0,27	0,64	0,47	0,46	0,83	0,79
1951-2006	0,47	0,46	0,52	0,72	0,45	0,60	0,32	0,48	0,65	0,75
AK1 ₂₁ m	0,38 ^a	0,34 ^{ac}	0,59 ^b	0,60 ^b	0,31 ^{cd}	0,44	0,33 ^{ad}	0,34 ^{ad}	0,62 ^b	0,68
AK1 ₂₁ s	0,20	0,18	0,20	0,16	0,30	0,25	0,24	0,23	0,11	0,08

Die Entwicklung der Autokorrelation über den Untersuchungszeitraum seit 1900 zeigt für alle Kernflächen relativ große Schwankungen. Grundlage der Analysen sind die einfachen linearen Korrelationskoeffizienten für gleitende 21-Jahres-Intervalle, bezogen auf die Mitte des Intervalls. Die Verteilung dieser Werte als Boxplots zeigt Abb. 4-45 links, rechts ist ihr

Verhalten über der Zeit zu sehen. Um die Zeitreihen trotz ihrer teilweise enormen Varianz anschaulich darzustellen, zeigen die Grafiken am Beispiel des herrschenden Bestandes den Verlauf der gleitenden Mittel der 21-Jahres-Korrelationen über sieben Jahre.

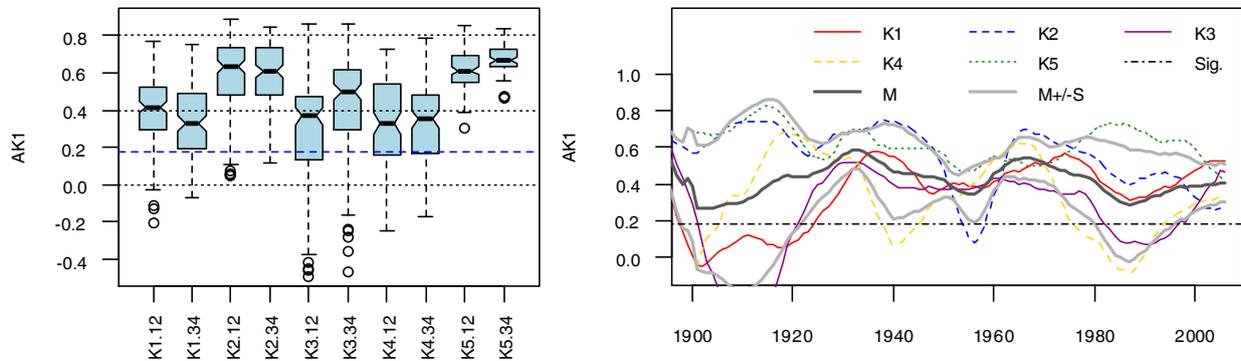


Abb. 4-45: Verteilung der Autokorrelation erster Ordnung (AK1) über gleitende 21-Jahres-Intervalle für die Kernflächen, getrennt nach Sozialklassen (links) sowie Verlauf der gleitenden Sieben-Jahres-Mittel über diese Werte, dargestellt für den herrschenden Bestand, mit Mittelkurve (M) und deren Standardabweichung (S). Zusätzlich ist die Signifikanzgrenze der Korrelationen (links: gestrichelte Linie, rechts: "Sig.") dargestellt.

Die Autokorrelation in den Jahrringbreiten-Zeitreihen der Zusatzflächen (berechnet für gleitende 21-Jahres-Intervalle) schwankt über die jeweils abgedeckten Zeiträume in relativ weiten Grenzen, die in Abb. 4-46 durch die Enden der Verteilung (also etwa die doppelte Standardabweichung) erkennbar sind. Das flächenübergreifende Mittel liegt bei etwa 0,38. Die "notches" (Einschnürungen) der Boxes ermöglichen eine Beurteilung signifikanter Unterschiede zwischen den Verteilungen auf den einzelnen Flächen: Überschneiden sie sich (wie die Zusatzflächen in Fünfeichen FE118-FE56), so sind sich die Bestände hinsichtlich der internen "Pufferung" ähnlich, andernfalls gibt es statistisch bedeutsame Differenzen im Autokorrelationsmuster (wie im Revier Dubrow bei Dub3421 und Dub3432).

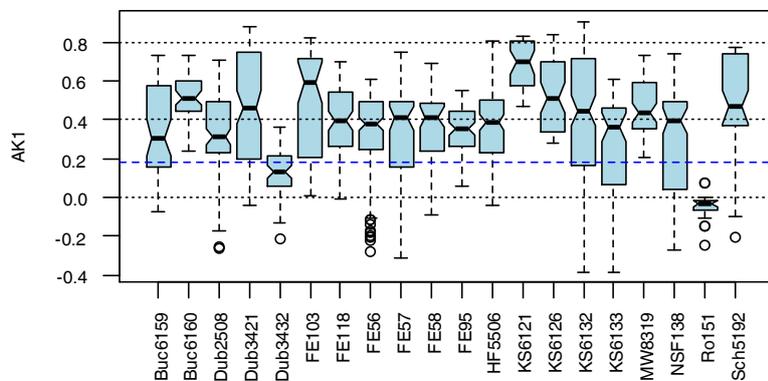


Abb. 4-46: Verteilung der Werte für die Autokorrelation erster Ordnung (AK1) über gleitende 21-Jahres-Zeiträume in den Zeitreihen der Jahrringbreite für die herrschenden Trauben-Eichen auf den Zusatzflächen. Zusätzlich ist die Signifikanzgrenze der Beziehung als gestrichelte blaue Linie dargestellt.

Das zeitabhängige Verhalten der mittleren 21-Jahres-Autokorrelation – wegen größerer Übersichtlichkeit auch hier als gleitendes Sieben-Jahres-Mittel dargestellt – weist eine hohe

Schwankungsbreite auf mit zwei Tiefpunkten zu Beginn (um 1910) und am Ende (zwischen 1980 und 1990) der Beobachtungsperiode (Abb. 4-47). Dieses Muster korrespondiert auffällig mit der Entwicklung desselben Parameters auf den deutschen Flächen der Klimasequenz (vergleiche Abb. 4-45). So wie dort zeigt sich auch auf der Mehrheit der Zusatzflächen zum Ende des Untersuchungszeitraums eine Erholung der AK1-Werte und damit eine verbesserte interne Pufferung der Bäume gegenüber externen Einflüssen. Zeitabhängige Trends zu größerer oder kleinerer Autokorrelation sind aus den Stichproben der Zusatzflächen ebenso wenig abzuleiten wie aus denen der Kernflächen.

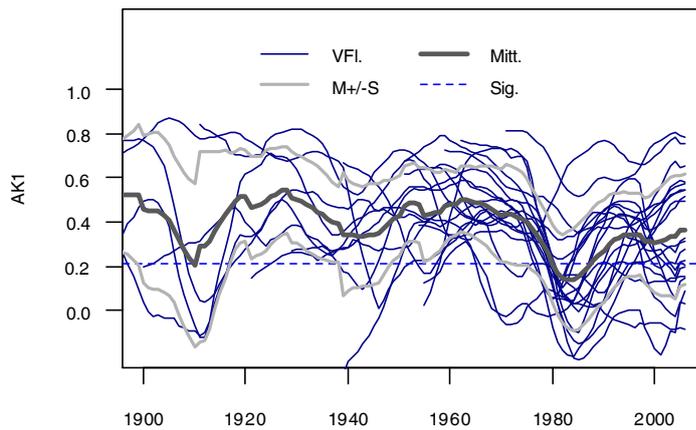


Abb. 4-47: Verlauf der gleitenden Mittel über sieben Jahre der Werte für die Autokorrelation erster Ordnung (AK1) über wandernde 21-Jahres-Zeiträume in den Zeitreihen der Jahrringbreite für die herrschenden Trauben-Eichen auf den Zusatzflächen. Zusätzlich ist die mittlere Signifikanzgrenze der Korrelationen als gestrichelte Linie (Sig.) dargestellt.

Die Sensitivität in den Zeitreihen als Pendant zur Autokorrelation lässt sich zwar jährlich berechnen, wird zur graphischen Prüfung ihrer Entwicklung über der Zeit aber ebenfalls in Form der Mittelwerte von wandernden 21-Jahres-Intervallen dargestellt ($n = 21$ in Formel 3-10). Dies soll mögliche Extrema als Artefakte des Berechnungsverfahrens ausschließen und die zeitliche Gebundenheit des Wuchsverhaltens an vorangegangene Zeiträume berücksichtigen (Abb. 4-48 rechts). Die in Tab. 4-12 zusammengefassten Mittel und Standardabweichungen über verschiedene Zeiträume beziehen sich wiederum auf die jährlich nach Formel 3-10 (links) berechnete Sensitivität der Jahrringbreiten-Zeitreihen der Trauben-Eichen auf den Kernflächen.

Tab. 4-12: Mittlere jährliche Sensitivität (S_{am}) für verschiedene Zeiträume mit Standardabweichung (s) für die Bohrkern-Stichproben aus den Eichenpopulationen der Kernflächen, unterteilt nach Sozialklassen. Werte mit gleichen Indexbuchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.

S_{am}	K1		K2		K3		K4		K5	
	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4
Gesamt	0,20	0,23	0,14	0,14	0,16	0,17	0,16	0,17	0,15	0,14
s	0,15	0,16	0,11	0,12	0,14	0,14	0,13	0,13	0,14	0,13
1900-2006	0,20 ^{ab}	0,21 ^a	0,14 ^{cd}	0,12 ^d	0,16 ^c	0,15 ^c	0,16 ^{bc}	0,17 ^{bc}	0,15 ^{cd}	0,14 ^{cd}
s	0,15	0,14	0,11	0,11	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14	0,13
1900-1950	0,21	0,22	0,13	0,12	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,17
s	0,16	0,16	0,10	0,11	0,14	0,13	0,13	0,14	0,17	0,16
1951-2006	0,19	0,20	0,15	0,12	0,16	0,14	0,16	0,16	0,12	0,11
s	0,15	0,13	0,12	0,11	0,13	0,12	0,13	0,13	0,10	0,08

Die mittlere Sensitivität der einheitlichen Untersuchungsperiode seit 1900 liegt auf K1 am höchsten und auf K2 am niedrigsten. Statistisch vergleichbar sind K1 und K4 einerseits sowie K2, K3 und K5 andererseits, wobei sich K4 nicht wesentlich von der zweiten Gruppe unterscheidet, wohl aber K1. Auf keiner Fläche und in keiner Bezugsperiode gibt es statistisch signifikante Differenzen zwischen den Sensitivitäten im herrschenden und im beherrschten Bestand. Im Vergleich der ersten und der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts unterscheiden sich die mittleren Sensitivitäten nur auf K5 signifikant, auf den anderen Flächen bestehen keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Wachstumsperioden, obwohl die Werte tendenziell für die Zeit ab 1951 im Vergleich zur Vorperiode etwas niedriger liegen.

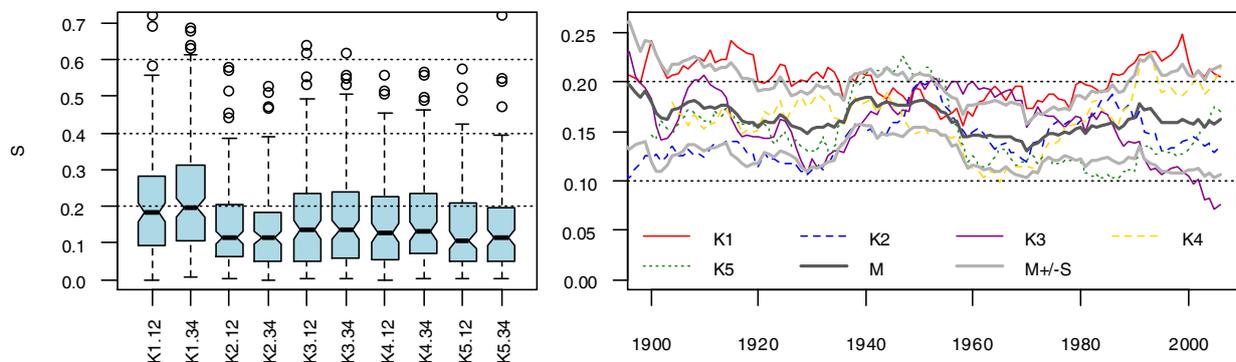


Abb. 4-48: Sensitivität der Jahrringbreiten-Zeitreihen der Kernflächen als Mittelwerte über den gesamten Beobachtungszeitraum, getrennt nach Sozialklassen (links) sowie als gleitendes Mittel über 21-Jahres-Intervalle, dargestellt für den herrschenden Bestand, mit Mittelkurve (M) und deren Standardabweichung (S).

Auch die Verteilung der jährlichen Sensitivitäten zeigt die etwas höher liegenden Werte für K1 und die hohe Vergleichbarkeit der restlichen Flächen sowie – jeweils untereinander – der Teilbestände (Abb. 4-48 links). In der zeitlichen Entwicklung sieht man ein ähnliches Bild (Abb. 4-48 rechts): Die (herrschenden) Eichen auf K1 haben durchgängig am empfindlichsten auf äußere Einflüsse reagiert und zeigen nach stetig fallenden Werten bis etwa 1950 seitdem wieder einen ansteigenden Trend. Dieses Muster trifft auch für K4 zu, während K3 nach wechselhafter erster Hälfte einen deutlich fallenden Trend in der mittleren Sensitivität aufweist. K2 und K5 verhalten sich in etwa stationär, das heißt ohne zeitliche Trends.

Bei der Analyse der Zusatzflächen-Zeitreihen ergeben sich ähnliche Sensitivitätsniveaus wie auf den Kernflächen (Abb. 4-49). Auffällig sind die niedrigen Werte auf der überdurchschnittlich nährstoffversorgten Fläche in Schwenow (Sch5192), die hohen Sensitivitäten auf der jüngsten Fläche Ro151 sowie die nahezu identischen Mediane auf den sechs Flächen im Revier Fünfeichen (FE103-FE95). Die zum Teil sehr großen Spannweiten mit den auffälligen Ausreißern erklären sich aus der jährlichen Berechnungsweise, die in der Dendroökologie wegen ihrer Anfälligkeit gegenüber Jahren mit extremen Witterungsverhältnissen mit entsprechenden Zuwachsreaktionen eher unüblich ist (SCHWEINGRUBER 1983). Hier dient

sie der Darstellung gerade des weiten Streubereichs, in dem sich die jährlichen Sensitivitäten bewegen können.

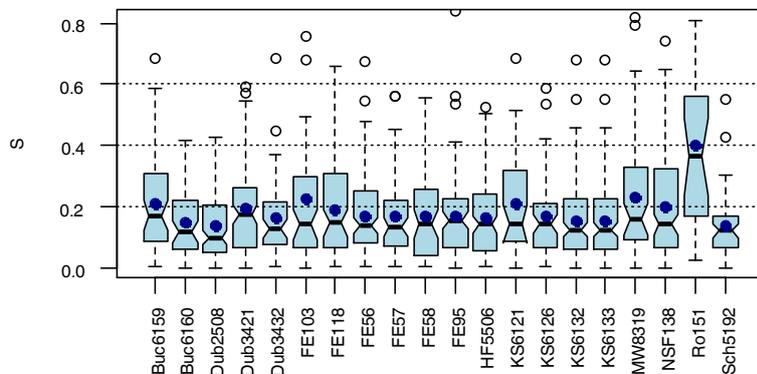


Abb. 4-49: Verteilung der Werte für die jährliche Sensitivität (S) in den Zeitreihen der Jahrringbreite für die herrschenden Traubeneichen auf den Zusatzflächen. Als blaue Punkte sind zusätzlich die arithmetischen Mittelwerte angegeben.

In der Betrachtung des Verhaltens der Sensitivität auf den Zusatzflächen über der Zeit zeigt sich bei aller mittelwelligen Variation ein ähnlich stationäres Muster wie für die Kernflächen. Alle Flächen bewegen sich im Mittel zwischen Werten von 10 – 30 %, nur die relativ jungen Eichen der Fläche Ro151, die in der zweiten Schicht unter Kiefernschirm stehen, heben sich davon bei mittleren Sensitivitäten um 40 % ab (Abb. 4-50). Hinsichtlich ihrer mittleren Sensitivität über den gesamten Untersuchungszeitraum unterscheiden sich die Kernflächen ($S_{am} = 17,9 \% \pm 15,4 \%$ Standardabweichung) nicht von den Zusatzflächen ($S_{am} = 18,5 \% \pm 3,6 \%$). In der Entwicklung beider mittlerer Reihen ist kein zeitlicher Trend zu erkennen.

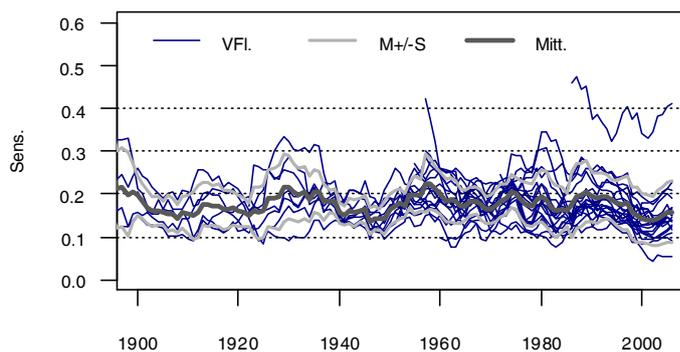


Abb. 4-50: Verlauf der gleitenden Mittel (elf Jahre)¹ über die jährliche Sensitivität (Sens.) in den Zeitreihen der Jahrringbreite (VfL.) für die herrschenden Traubeneichen auf den Zusatzflächen. Zusätzlich ist der Verlauf des arithmetischen Mittels (Mitt.) plus/minus der Standardabweichung (S) angegeben.

Das komplementäre beziehungsweise gegenläufige Verhältnis zwischen Autokorrelation als interner Pufferung und Sensitivität als Empfindlichkeit externen Einflüssen gegenüber soll im Folgenden für Kern- und Zusatzflächen geprüft werden. Dazu werden zum einen jeweils

¹ Im Vergleich zur Sensitivität der Kernflächen (21 Jahre) wurde der Zeitraum zur Berechnung der gleitenden Mittel mit elf Jahren hier kleiner gewählt, weil ein Teil der Zusatzflächen noch relativ jung ist und entsprechend kurze Zeitreihen aufweist.

die Mittelkurven über alle Stichproben genutzt (Abb. 4-51), zum anderen die flächenspezifischen Kombinationen der beiden Parameter.

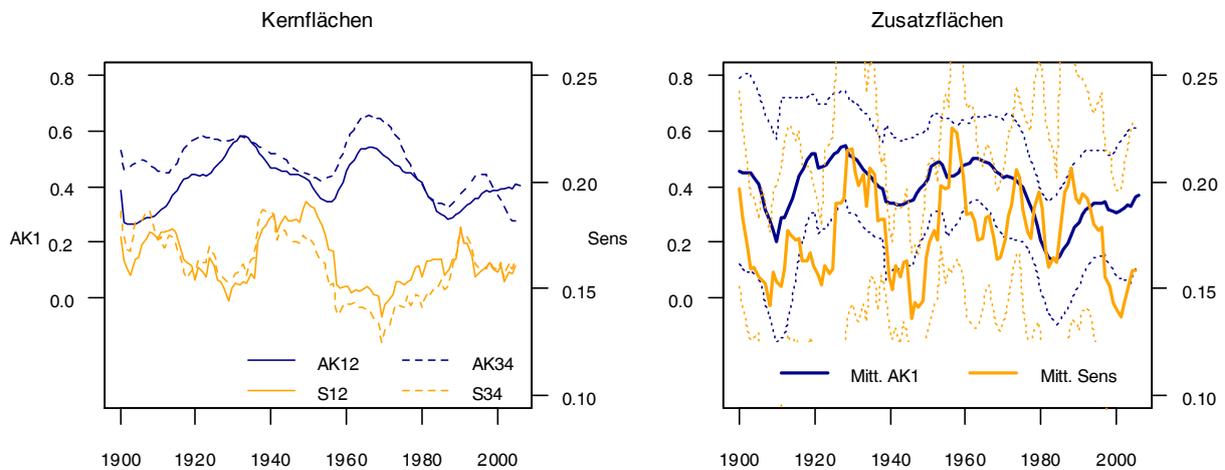


Abb. 4-51: Zeitlicher Verlauf der mittleren Autokorrelation erster Ordnung (AK1, Ordinate links) und Sensitivität (Sens, Ordinate rechts) in den Jahrringbreiten-Zeitreihen. Für die Kernflächen (links) sind der herrschende (AK12 bzw. S12) und der beherrschte Bestand (AK34 bzw. S34) getrennt ausgewiesen, für die Zusatzflächen ist neben der Mittelkurve (Mitt.) auch der Verlauf der Werte Mittel \pm Standardabweichung durch gepunktete Linien dargestellt.

Die Analyse des zeitabhängigen Verlaufs der Mittelkurven für die *AK1* belegt die Ähnlichkeit in der mittleren Autokorrelation zwischen Kern- und Zusatzflächen mit zwei lokalen Maxima ungefähr bei 1935 und 1965 sowie einem ausgeprägten Minimum zu Beginn der 1980er Jahre. Seitdem steigen die Werte in beiden Kollektiven wieder und zeigen damit eine zunehmende interne Pufferung äußerer Einflüsse an. Die mittlere Sensitivität auf den Kernflächen verhält sich reziprok dazu: Ihre Minima liegen dort, wo die Pufferung am höchsten ist, ihre Maxima treten in etwa dann auf, wenn die Pufferung gering ist (Abb. 4-51 links). Auf den Zusatzflächen ist dieser Zusammenhang weniger deutlich, als Gründe dafür sind die dort deutlich größere Altersspanne und die zum Teil untergeordnete soziale Stellung der Trauben-Eichen anzunehmen, denn forstliche Eingriffe sind für Bestände in der Unterschicht ein relevanter zusätzlicher Einflussfaktor auf die Sensitivität. Unterschiede zwischen Kern- und Zusatzflächen sind außerdem dadurch zu erklären, dass zum ersten Kollektiv auch zwei polnische Flächen mit ihren abweichenden Standortbedingungen gehören.

Als nächstes soll anhand der Kombination von *AK1* und Sensitivität der Frage nachgegangen werden, ob sich in der jüngsten Vergangenheit, das heißt seit dem starken Anstieg berichteter Eichenschäden in Europa um 1980, die mittleren Werte der beiden Parameter deutlich verändert haben. Dazu werden Streu- beziehungsweise Konfidenz-Ellipsen konstruiert, die als Koordinaten ihres Mittelpunkts jeweils die Mittelwerte von *AK1* (x) und Sensitivität (y) in den Perioden 1900-1980 (schwarz) beziehungsweise 1981-2006 (blau) haben, die Halbachsen sind durch die Standardabweichungen der beiden Größen bestimmt. Das Prinzip verdeutlicht die Abb. 4-52 am Beispiel der Flächen K4 und K5.

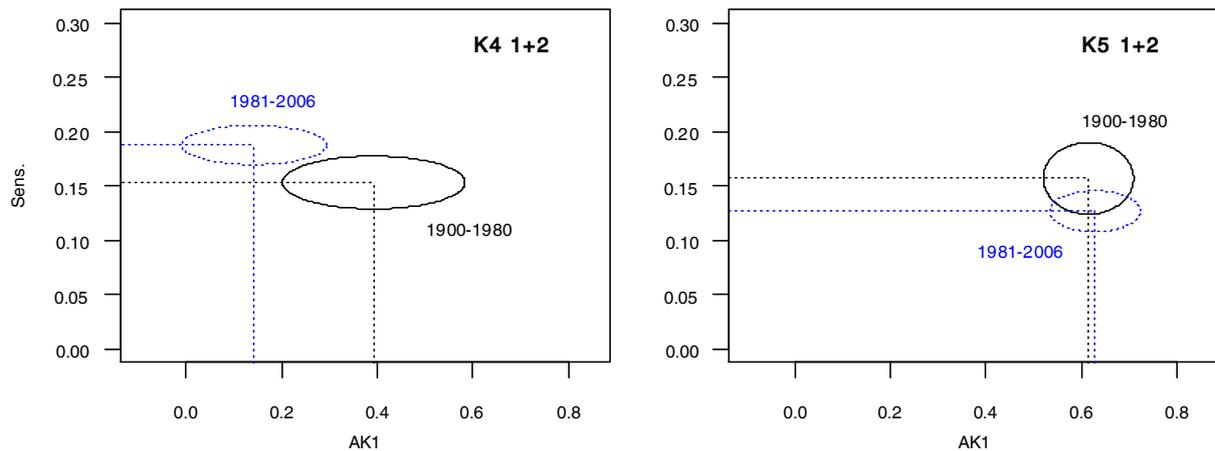


Abb. 4-52: Verschiebung der Mittelwerte von Autorrelation erster Ordnung (AK1) und Sensitivität (Sens.) von der Periode 1900-1980 zur Periode 1981-2006 in den Zeitreihen der Jahrringbreite des herrschenden Bestandes auf den Flächen K4 und K5. Die Mittelwerte sind durch die Bezugslinien markiert, ihre Standardabweichungen geben die Werte für die Halbachsen der Ellipsen vor.

Die Art der Darstellung folgt BECK (2009), der für die Baumart Rot-Buche seit 1990 auffällige Verschiebungen in der Interaktion von Pufferung und Empfindlichkeit feststellte. Da die meisten der hier verwendeten Zeitreihen nur bis 2006 reichen, wird der Beginn dieser besonders zu untersuchenden Periode auf 1980 vorverlegt, um hinreichend lange Zeiträume für die Berechnung der Parameter zu erhalten. Eine Verlagerung nach links oben wie bei K4 (Abb. 4-52 links) bedeutet eine höhere Sensitivität bei geringerer Autokorrelation erster Ordnung von 1981-2006 im Vergleich zur Zeit davor. Dies ließe sich als stärkere Reaktionen auf externe Einflüsse bei reduzierter interner Pufferung interpretieren. K5 zeigt im Kontrast dazu bei etwa konstanter Autokorrelation eine Abnahme der Empfindlichkeit für die zweite Periode. Hier könnte man auf eine noch etwas robuster werdende Reaktion auf Umwelteinflüsse bei stabiler interner Pufferung schließen.

In den folgenden Abb. 4-53 und Abb. 4-54 sind die periodenbezogenen Veränderungen für alle Flächen sowie – auf den Kernflächen – für die beiden Sozialklassen dargestellt, wegen der größeren Übersichtlichkeit getrennt für Kern- und Zusatzflächen. Neben den Einzelflächen schließen die Abbildungen auch das Verhalten der jeweiligen Mittelkurven ein.

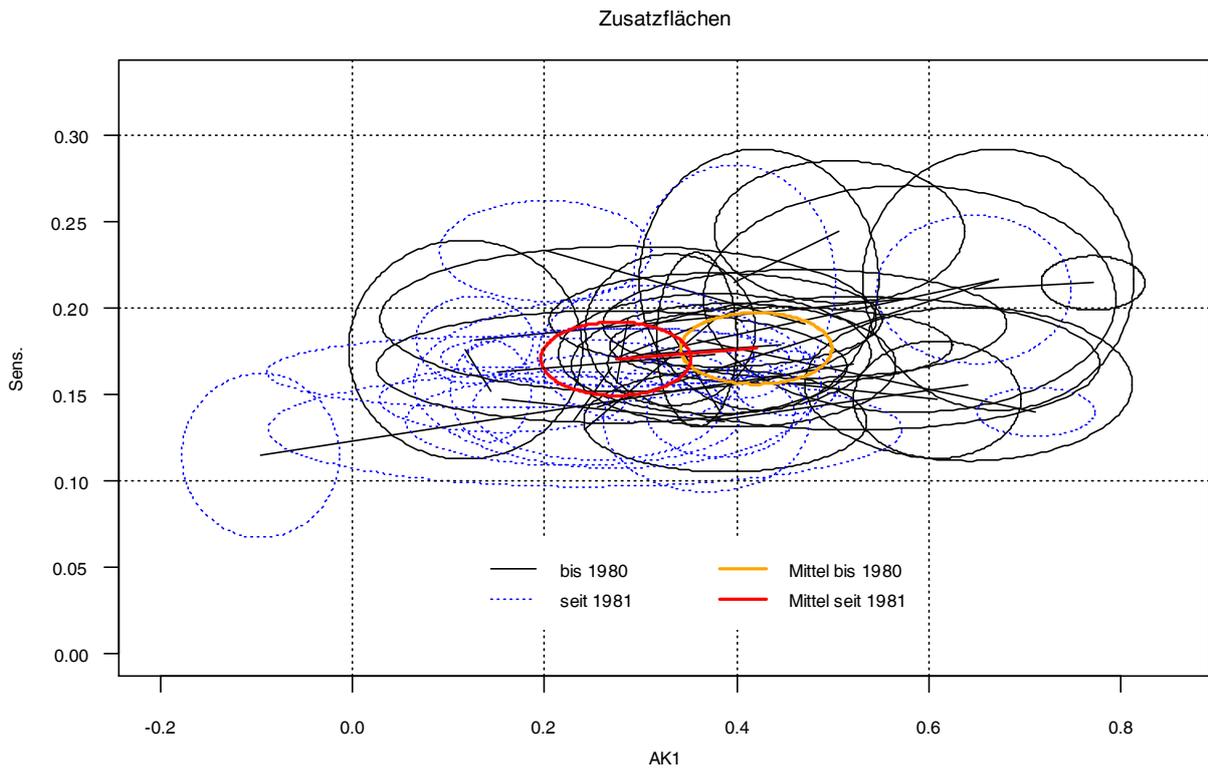


Abb. 4-53: Veränderung der mittleren Autokorrelation (AK1) und Sensitivität (Sens.) in den Zeitreihen der Jahrringbreite auf den Zusatzflächen im Vergleich der Perioden bis 1980 und seit 1981. Die Ellipsen stehen für je eine Zusatzfläche, schwarz gezeichnet sind die Werte für die Zeit bis 1980, blau gestrichelt die für die Zeit 1981-2006. Sie geben in ihren Halbachsen die Standardabweichung des betreffenden Parameters an. Dargestellt ist auch die Veränderung zwischen den beiden Zeiträumen im Mittel über alle Zusatzflächen.

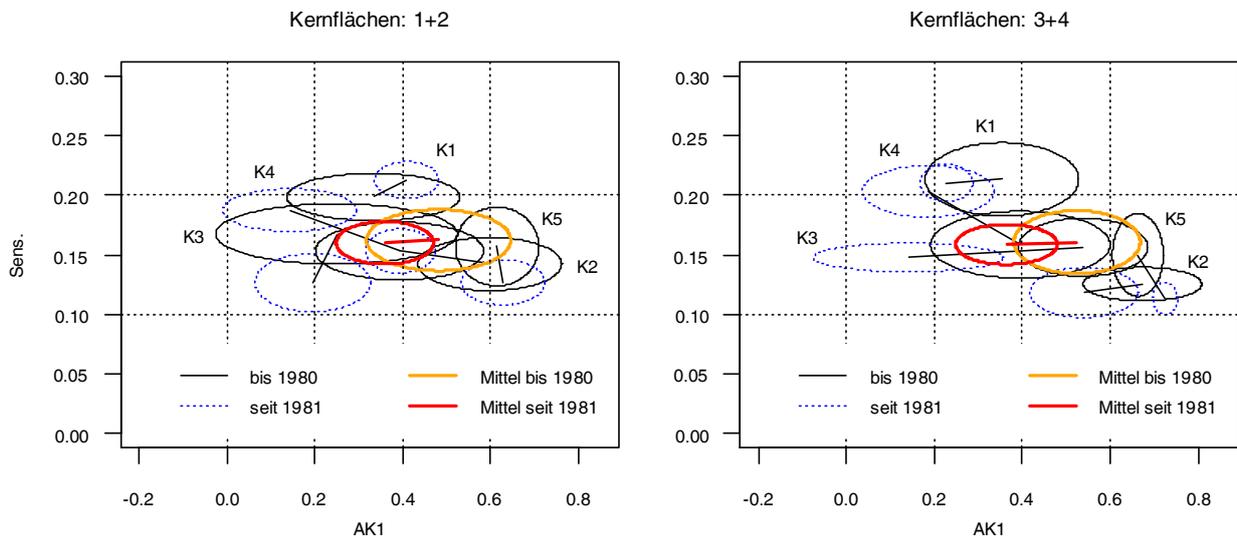


Abb. 4-54: Veränderung der mittleren Autokorrelation (AK1) und Sensitivität (Sens.) in den Jahrringbreiten-Zeitreihen der Kernflächen im Vergleich der Perioden bis 1980 und seit 1981, getrennt nach herrschendem (1+2) und beherrschtem (3+4) Bestand. Die Ellipsen geben in ihren Halbachsen die Standardabweichung des betreffenden Parameters an, die verschiedenen Perioden sind jeweils durch einen Strich verbunden. Dargestellt ist auch die Veränderung zwischen den beiden Zeiträumen im Mittel der betreffenden Kollektive.

Die Auswertung der Periodenvergleiche zeigt, dass in den meisten Fällen die mittlere Autokorrelation in der Zeit seit 1981 niedriger liegt als im langjährigen Mittel bis 1980. Die mittleren Sensitivitäten der beiden Perioden hingegen unterscheiden sich – bei relativ großer Streuung – dagegen nicht voneinander. Herrschender und beherrschter Bestand auf den Kernflächen verhalten sich sehr ähnlich. Bei der Beurteilung der dargestellten Werte ist zu berücksichtigen, dass der Verlauf der AK1 auf Kern- und Zusatzflächen kurz nach 1980 ein auffälliges lokales Minimum mit einer anschließenden Erholungsphase aufweist, die bis heute andauert (siehe Abb. 4-51). Der zeitliche Trend weist also nach oben, wird aber von den Durchschnittswerten so nicht wiedergegeben.

4.2.5 Jahrringindex-Zeitreihen: Darstellung und Eigenschaften

– Kernflächen –

Die Jahrringindex-Zeitreihen der Einzelbäume wurden nach dem in 3.3.1 und Abb. 3-21 beschriebenen Verfahren mit Hilfe des Programms CLIMTREG hergeleitet. Das arithmetische Mittel der nach dem Ausschluss "untypischer" Proben verbliebenen Bäume ist die Bestandes-Chronologie, die auf den Klimasequenz-Flächen separat für den herrschenden und den beherrschten Bestand ermittelt wurde. Abb. 4-56 stellt die Chronologien der Sozialklasse "1+2" der fünf Kernflächen vergleichend dar (siehe auch Anhang 8.4).

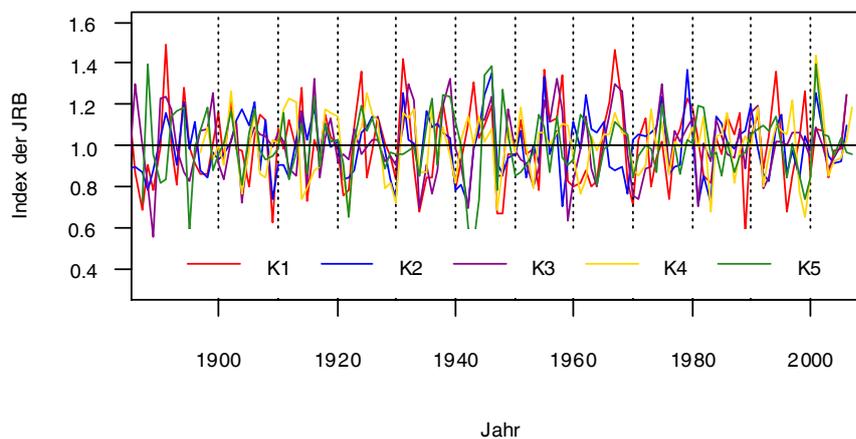


Abb. 4-55: Jahrringindex-Zeitreihen des herrschenden Bestands auf den fünf Kernflächen (JRB = Jahrringbreite)

Im Allgemeinen verlaufen die Jahrringindex-Zeitreihen für die beiden Sozialklassen sehr synchron, die resultierenden Korrelationskoeffizienten zwischen den Chronologien enthält die Tab. 4-13. Abb. 4-56 stellt die Beziehungen auf K1 und K2 mit dem höchsten beziehungsweise dem niedrigsten Korrelationskoeffizienten dar.

Tab. 4-13: Korrelationskoeffizienten (R nach PEARSON) zwischen den Zeitreihen des mittleren Jahrringindexes für den herrschenden (Sozialklasse 1+2) und den beherrschten (Sozialklasse 3+4) Bestand der Kernflächen.

		K1		K2		K3		K4		K5
		1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2
K1	3+4	0,961								
K2	1+2	0,300	0,250							
	3+4	0,292	0,265	0,846						
K3	1+2	0,502	0,487	0,343	0,301					
	3+4	0,532	0,527	0,314	0,312	0,897				
K4	1+2	0,297	0,311	0,233	0,173	0,286	0,279			
	3+4	0,305	0,315	0,246	0,206	0,268	0,306	0,925		
K5	1+2	0,114	0,132	0,309	0,269	0,357	0,314	0,325	0,338	
	3+4	0,156	0,164	0,270	0,287	0,353	0,364	0,265	0,255	0,886

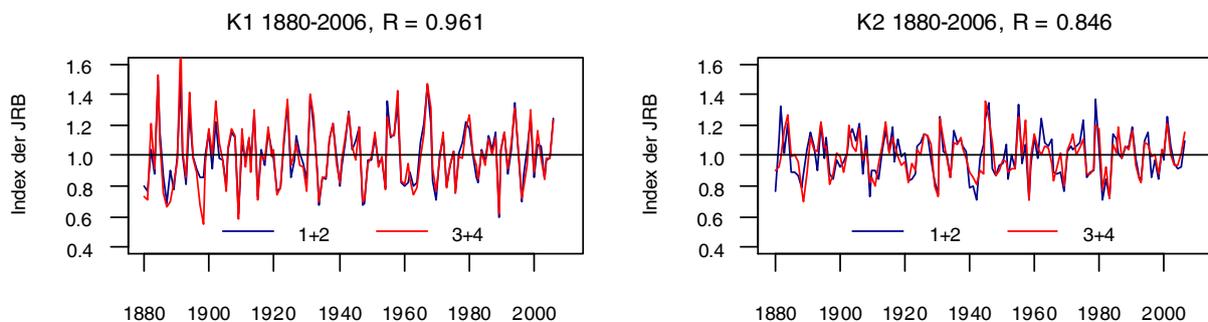


Abb. 4-56: Verlauf der Bestandes-Chronologien (Zeitreihen des mittleren Jahrring-Index) für den herrschenden (1+2) und den beherrschten Bestand (3+4) der beprobten Trauben-Eichen auf K1 und K2. JRB = Jahrringbreite

Für die Beurteilung der auf Basis von Bohrkernstichproben ermittelten Ergebnisse ist es wichtig zu wissen, wie gut die entnommene Stichprobe die Verhältnisse für alle Bäume dieser Art im Gesamtbestand repräsentiert. Die folgende Tab. 4-14 stellt deshalb die *Expressed Population Signal* (EPS)-Werte für die Eichen der Klimasequenzflächen in Bezug auf verschiedene Zeit- beziehungsweise Altersabschnitte dar (siehe Formel 3-4). Grundlage sind die individuellen Jahrringindex-Zeitreihen der Bäume, die nach der Stichprobenbereinigung (siehe 3.3.1 und Abb. 3-21) weiter berücksichtigt wurden. Die Berechnungen erfolgten getrennt nach den Sozialklassen 1+2 und 3+4 (siehe 3.1.4). Zur Einschätzung der Homogenität der Zeitreihen innerhalb einer Stichprobe sind außerdem die mittleren Korrelationskoeffizienten zwischen den Einzelzeitreihen je Fläche und Teilbestand angegeben.

Tab. 4-14: Korrelationskoeffizienten (R nach PEARSON) und *Expressed Population Signal* (EPS) für die Bohrkern-Stichproben aus den Eichenpopulationen der Klimasequenzflächen, unterteilt nach Sozialklassen.

		K1		K2		K3		K4		K5	
		1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4
n		18	12	22	9	24	14	18	14	16	9
EPS	1900-2006	0,967	0,946	0,945	0,746	0,969	0,931	0,968	0,950	0,943	0,859
	1900-1950	0,963	0,936	0,940	0,717	0,969	0,931	0,971	0,954	0,965	0,903
	1950-2006	0,971	0,956	0,944	0,780	0,970	0,934	0,965	0,949	0,906	0,788
R	1900-2006	0,618	0,591	0,438	0,246	0,575	0,492	0,637	0,594	0,509	0,404
	1900-1950	0,591	0,550	0,414	0,220	0,573	0,491	0,659	0,612	0,636	0,508
	1950-2006	0,649	0,643	0,435	0,283	0,581	0,501	0,621	0,589	0,376	0,292

In der Mehrzahl liegen die EPS-Werte über der von WIGLEY et al. (1984) formulierten Schwelle von 0,85 und lassen dann mit hinreichender Sicherheit erwarten, dass sich das in den Stichproben nachweisbare Witterungssignal nicht von dem auf die Gesamtpopulation wirkenden unterscheidet. Der beherrschte Bestand auf K2 (in allen betrachteten Perioden) sowie auf K5 (in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts) weisen eine so hohe Variabilität zwischen den Probebäumen auf, dass das EPS dort unter dem Schwellwert liegt und die Signalstruktur in der Stichprobe nicht als repräsentativ angesehen werden kann.

Die Korrelationskoeffizienten zeigen sehr unterschiedliche Niveaus der Übereinstimmung zwischen den einzelnen Jahrringindexreihen der bestandesbezogenen Stichproben an. Am höchsten liegen die Werte für die herrschenden Eichen der Fläche K1, am niedrigsten ist die Korrelation zwischen den beherrschten Bäumen auf K2. Allgemein weist die Sozialklasse 1+2 eine stärkere Übereinstimmung auf als die Sozialklasse 3+4. Der Vergleich der beiden Hälften des vergangenen Jahrhunderts anhand der mittleren paarweisen Korrelation über gleitende Zeitfenster von 21 Jahren Länge fällt unterschiedlich aus: Während in den weiter östlich gelegenen Beständen K3 bis K5 die Korrelationen mit zunehmender Zeit tendenziell sinken, steigen sie für K1 und K2 an. Den Verlauf über die Zeit stellt beispielhaft die Abb. 4-57 dar.

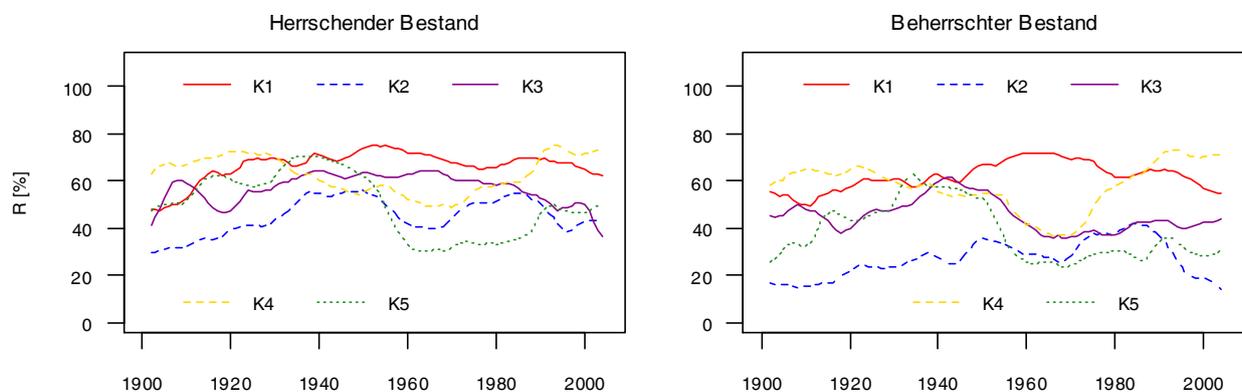


Abb. 4-57: Mittlere Korrelationskoeffizienten zwischen den Jahrringindex-Zeitreihen der Einzelbäume auf den Kernflächen über der Zeit, berechnet für gleitende 21-Jahres-Intervalle

Die Gleichläufigkeit (GLK) der Jahrringindex-Zeitreihen wurde für die Bestände der Kernflächen ebenfalls getrennt nach den Sozialklassen sowie für verschiedene Zeiträume bestimmt. Tab. 4-15 gibt entsprechend die Werte für den gesamten Untersuchungszeitraum seit 1900, für die erste Hälfte des vergangenen Jahrhunderts sowie für dessen zweite Hälfte bis zum letzten erfassten Jahr 2006 wieder. Um Veränderungen in der Einheitlichkeit der Jahrringbreitenvariation besser einschätzen zu können, sind für dieselben Zeiträume zusätzlich die prozentualen Anteile der Jahre mit GLK-Werten von 100 % (entspricht völliger Parallelität) dargestellt. Die Abb. 4-58 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den einzelnen Flächen sowie den Sozialklassen anhand von Boxplots mit den Medianen und Interquartilsbereichen der jährlich berechneten GLK. Dabei steht zum Beispiel das Kürzel "K1.12" für den herrschenden Bestand auf K1 (Sozialklasse 1+2), "K4.34" bezeichnet den beherrschten Bestand (Sozialklasse 3+4) auf der Fläche K4.

Tab. 4-15: Mittlere Gleichläufigkeit (GLK) und Anteil der Jahre mit einem GLK-Wert von 100 % (a_{100}), beides in Prozent, für die Bohrkern-Stichproben aus den Eichenpopulationen der Kernflächen, unterteilt nach den Sozialklassen 1+2 und 3+4.

		K1		K2		K3		K4		K5	
		1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4	1+2	3+4
n		18	12	22	9	24	14	18	14	16	9
GLK	1900-2006	64,0	63,9	44,9	42,7	55,8	53,2	60,9	63,0	52,7	43,9
[%]	1900-1950	64,9	63,1	40,5	39,0	59,0	55,9	61,7	64,6	61,3	51,8
	1950-2006	63,2	64,6	46,0	52,8	52,8	50,8	60,1	61,5	44,9	37,3
a_{100}	1900-2006	18,7	24,3	4,7	7,5	13,1	12,2	25,9	18,8	16,7	12,0
[%]	1900-1950	19,6	21,6	5,9	3,9	17,6	15,7	27,5	15,9	27,5	21,6
	1950-2006	17,9	26,8	3,6	10,7	8,9	8,9	25,0	21,1	7,1	3,6

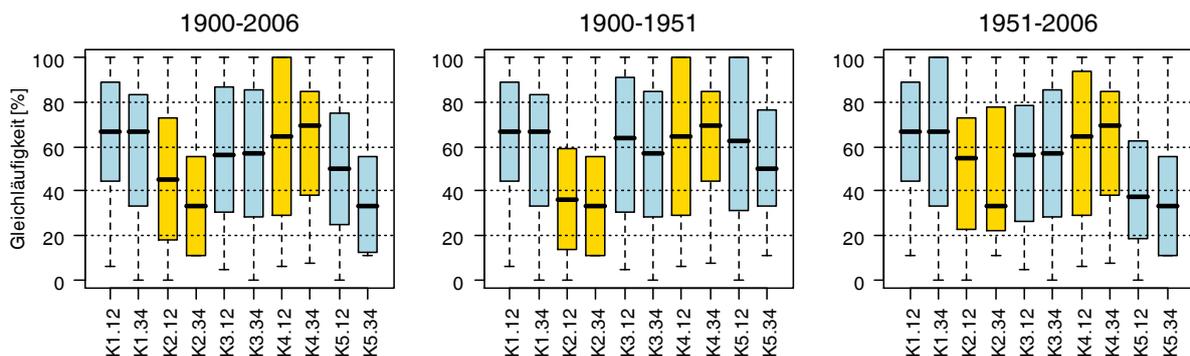


Abb. 4-58: Mittlere Gleichläufigkeit der Jahrringindex-Zeitreihen für die Sozialklassen 1+2 und 3+4 auf den Kernflächen, dargestellt für verschiedene Bezugszeiträume. Die unterschiedlichen Farben sollen die zusammengehörigen Sozialklassen einer Versuchsfläche hervorheben und die Unterscheidbarkeit der Flächen voneinander steigern.

Nach Tab. 4-15 und Abb. 4-58 treten je nach Fläche unterschiedliche temporale Veränderungen ("drifts") der mittleren Gleichläufigkeit auf. Während sie auf K2 in Südbrandenburg von der ersten zur zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts steigt, sinkt sie auf K5 in

Ostpolen deutlich ab. K1, K3 und K4 zeigen in beiden Sozialklassen keine Unterschiede zwischen beiden Perioden. Die beiden Sozialklassen sind nach t-Tests auf keiner Fläche und in keinem Bezugszeitraum statistisch signifikant unterschiedlich gleichläufig, eine Ausnahme ist die Stichprobe aus dem beherrschten Bestand auf K5, deren mittlere GLK im Gesamtzeitraum wesentlich niedriger liegt als die des herrschenden Bestandes. Sowohl im Gesamtzeitraum als auch für 1951-2006 unterscheidet sich diese Stichprobe in der GLK von anderen Flächen, einzig K2 liegt für beide Sozialklassen auf einem vergleichbaren Niveau wie die Fläche K5. Am anderen Ende der Skala bilden K1, K3 und K4 eine Gruppe ohne nachweisbare Unterschiede in der im Mittel vergleichsweise hohen GLK.

Zur detaillierteren Analyse des Verhaltens über der Zeit wurden zusätzlich gleitende Mittelwerte der GLK über elfjährige Perioden gebildet, die in Abb. 4-59 beispielhaft für die deutschen Flächen der K-Sequenz dargestellt sind. Der Verlauf des gleitenden Mittels der Korrelation innerhalb der Bohrkern-Stichproben (siehe Abb. 4-57) ist als Bezug ebenfalls enthalten.

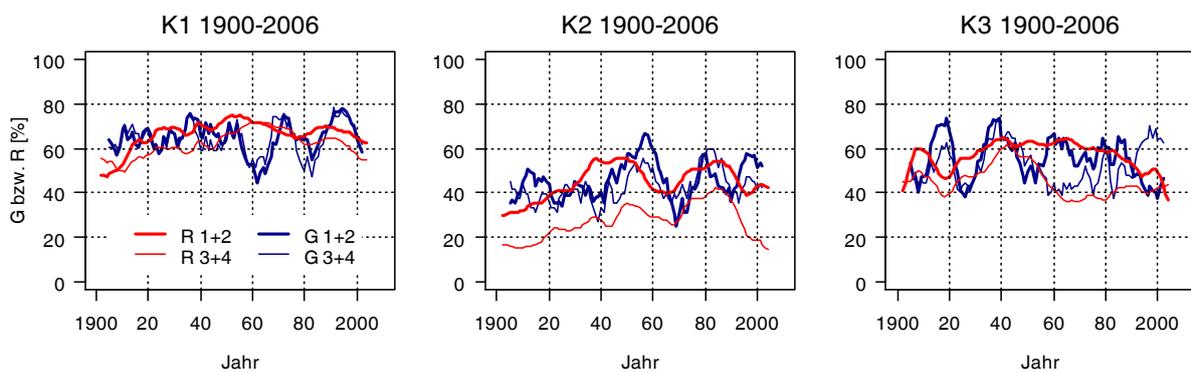


Abb. 4-59: Mittlere (jährliche) Gleichläufigkeit (G) und Korrelationskoeffizient (R) der Jahrringindex-Zeitreihen auf den Flächen K1 bis K3, getrennt nach den Sozialklassen 1+2 und 3+4 dargestellt als gleitende Mittel über 11 Jahre über der Periodenmitte, für die Gesamtzeit seit 1900 sowie getrennt für die erste (Mitte) und zweite (rechts) Hälfte des letzten Jahrhunderts.

Der Vergleich der mittleren Verläufe belegt das bereits angedeutete wesentlich niedrigere Gleichläufigkeits-Niveau auf K2. Erkennbar ist außerdem, dass sich herrschender und beherrschter Bestand hinsichtlich der GLK kaum unterscheiden, nur auf K3 sind die Kurven etwas weniger parallel. Die auffälligen Schwankungen der Kurven, die auf Intervalle höherer und niedrigerer GLK hindeuten, zeigen keine Parallelität zwischen den einzelnen Flächen, das gilt auch für die nicht dargestellten K4 und K5.

– Zusatzflächen –

Für die Zusatzflächen werden der Verlauf der mittleren Gleichläufigkeit sowie die mittlere Korrelation zwischen den Jahrringindex-Zeitreihen der Bohrkern-Stichproben der einzelnen Bäume herangezogen, um die zentrale Frage möglicher Veränderungen des Reaktionsverhaltens im Laufe der Zeit zu untersuchen (Abb. 4-60). Um mögliche Unterschiede in der

mittleren GLK zwischen den Flächen einschätzen zu können, sind die Boxplots mit "notches" dargestellt. Überschneiden sich diese Einschnürungsbereiche nicht, dann unterscheiden sich mit hoher statistischer Sicherheit die entsprechenden Verteilungen. Ein Beispiel sind die Stichproben von den Flächen HF5506 (niedrige GLK) und Dub3421 (hohe GLK; zu den Flächen siehe Tab. 3-2).

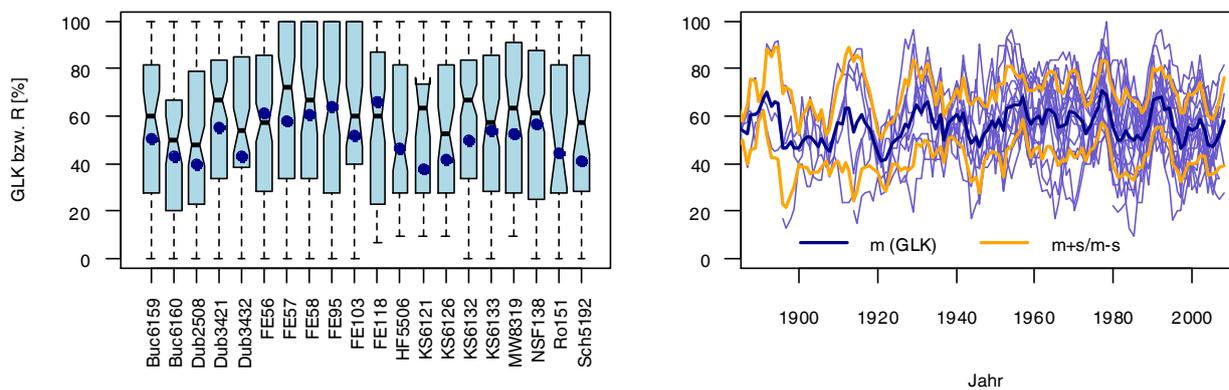


Abb. 4-60: Mittlere Gleichläufigkeit und Korrelation zwischen den Jahrringindex-Zeitreihen der Probebäume auf den Zusatzflächen. Links: Verteilung der (jährlichen) mittleren GLK anhand von Boxplots mit *notches*, als blaue Punkte dargestellt sind zusätzlich die arithmetischen Mittel der Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Bäumen je Stichprobe. Rechts: Verlauf der mittleren GLK über der Zeit, dargestellt für die fünfjährigen gleitenden Mittel je Fläche, mit dem Verlauf des Mittels über alle Flächen (m (GLK)) zuzüglich beziehungsweise abzüglich der Standardabweichung ($m+s/m-s$).

Über alle Zusatzflächen gemittelt liegt die Gleichläufigkeit innerhalb der Stichproben bei etwa 57 % mit einem Minimum in Dub2508 (38 %) und einem Maximum in FE57 (66 %). Die stichprobenbezogenen Mittelwerte der paarweisen Korrelationskoeffizienten zwischen den Probebäumen befinden sich in einem Bereich zwischen 0,38 (KS6121) und 0,66 (FE118) bei Standardabweichungen um 0,13, ihr arithmetisches Mittel beträgt 0,51. In Bezug auf die Verläufe der mittleren Jahrringindex-Zeitreihe je Fläche sind sich die Flächen FE56 und FE118 bei einem Korrelationskoeffizienten R von 0,86 am ähnlichsten, die größten Unterschiede bestehen zwischen den Stichproben von NSF138 und KS6126 ($R = -0,10$). Die Mittelkurven von Eichenpopulationen mit einem Alter unter 60 Jahren sind etwas schwächer miteinander korreliert als die von über sechzigjährigen Beständen ($R = 0,44$ vs. $R = 0,54$), ein Alterstrend hinsichtlich der Korrelation lässt sich jedoch nicht nachweisen. Über alle Flächen hinweg liegt der mittlere Korrelationskoeffizient bei 0,47.

Die Homogenität in der interannuellen Varianz zwischen den Probebäumen über der Zeit wurde auch hier anhand des Verlaufs der Gleichläufigkeit analysiert. Starke kurzfristige Schwankungen sind durch die Bildung gleitender Mittel abgeschwächt; im Vergleich zu den Kernflächen ist hier jedoch eine kleinere Bezugsperiode (fünf Jahre) gewählt, da einige der Zusatzflächen auf Grund ihres geringen Alters nur vergleichsweise kurze Zeitreihen von 40-60 Jahren aufweisen. Der Verlauf der Mittelkurve in Abb. 4-60 rechts zeigt, dass sich das Niveau der GLK im Untersuchungszeitraum trotz deutlicher Schwankungen in einzelnen

Jahrzehnten wie im Fall der Kernflächen nicht wesentlich verändert hat. Die nähere Betrachtung der Einzelzeitreihen stützt diese Einschätzung.

Im nächsten Auswertungsschritt verlässt die Analyse der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen die Ebene des Einzelbaumes und stützt sich nur noch auf die Bestandeschronologien, die für alle Zusatzflächen in Abb. 4-61 zusammengestellt sind. Auf Grund des unterschiedlichen Alters der Bestände nimmt die Anzahl der Chronologie nach rechts hin zu, damit steigen auch die Vielfältigkeit der abgebildeten Zuwachsverläufe und das optisch feststellbare "Rauschen". Trotzdem fallen einzelne Bereiche mit hoher Einheitlichkeit (zum Beispiel zwischen 1925 und 1945) oder einzelne Jahre wie 1992 oder 2001 auf, in denen sich alle beteiligten Stichproben einheitlich unter oder über dem Indexwert "1" befinden.

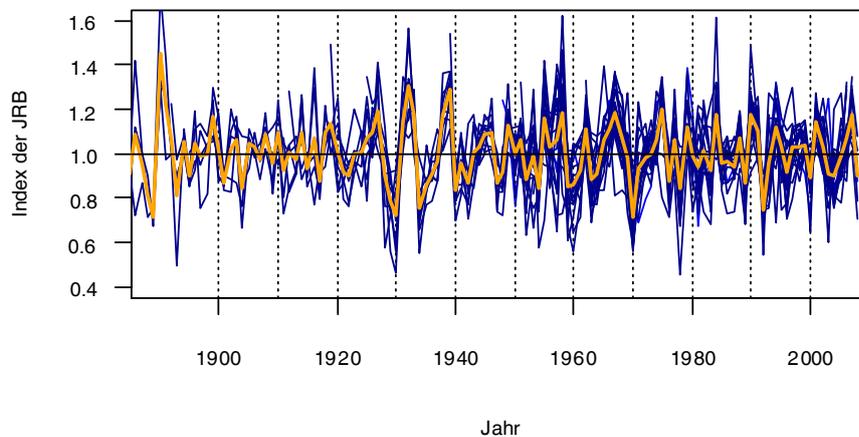


Abb. 4-61: Jahrringindex-Zeitreihen für die 20 Zusatzflächen im Vergleich, dargestellt ist zusätzlich der Verlauf des arithmetischen Mittels.

4.2.6 Weiserjahre

Für die Kernflächen wurden die einfachen und die extremen Weiserjahre im Zeitraum 1900-2006 getrennt für die Sozialklassen "1+2" und "3+4" bestimmt. Es ergibt sich ein Bild mit einzelnen Jahren wie 1934 (negativ) oder 2001 (positiv), die auf so gut wie allen Flächen nachzuweisen sind, sowie mit vielen nur auf wenigen Flächen auftretenden Weiserjahren (Abb. 4-62).

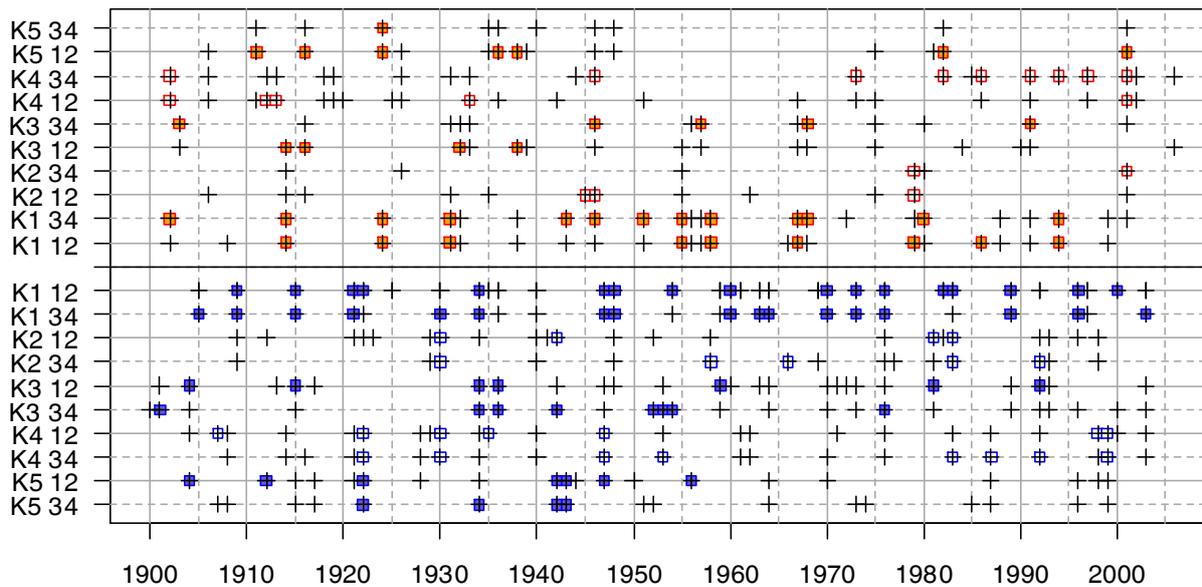


Abb. 4-62: Weiserjahre in den Stichproben des herrschenden ("1+2") und des beherrschten Bestands ("3+4") der Versuchsflächen K1-K5. In der oberen Hälfte sind die positiven, in der unteren die negativen Weiserjahre dargestellt. Quadrate kennzeichnen die extremen, Kreuze die einfachen Weiserjahre. Um die Flächen besser unterscheiden zu können, sind sie abwechselnd durch ausgefüllte und leere Formen dargestellt.

Die höchste Zahl von insgesamt auffälligen Jahren weisen die Eichen auf der Fläche K1 und hier der herrschende Bestand auf: Dort gibt es 24 positive (davon neun extreme) sowie 31 negative (davon 17 extreme) Weiserjahre. Das bedeutet auf die Länge der betrachteten Periode von 107 Jahren bezogen, dass mehr als die Hälfte der Wuchsjahre von verhältnismäßig großen und einheitlichen Abweichungen der Jahrringbreite vom mittleren Trend gekennzeichnet waren. Ein ähnliches Muster zeigen die Eichen der anderen Flächen, durchgängig ist die Zahl der einfachen Weiserjahre sowohl im positiven als auch im negativen Sinne in der Sozialklasse "1+2" höher als in der Sozialklasse "3+4". Für die extremen Weiserjahre gilt dies nicht, hier kommt es durchaus vor, dass wie auf K1 im beherrschten Bestand 13 und im herrschen neun Jahre angezeigt werden. Allgemein gibt es mehr negative als positive Weiserjahre, die absolut wenigsten weist die Fläche K5 auf. Die vollständigen Zahlen enthält die Tab. 4-16. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass jedes extreme gleichzeitig ein einfaches Weiserjahr ist, demnach enthalten die Spalten "+" und "-" die Summe aller Weiserjahre, also der einfachen sowie der extremen Jahre. Letztere sind in den Spalten "++" und "--" gesondert aufgeführt.

Tab. 4-16: Anzahl der positiven ("+") und negativen ("-") Weiserjahre auf den Flächen K1 bis K5 im Zeitraum 1900-2006, getrennt nach den Sozialklassen 1+2 und 3+4. Die davon extremen Weiserjahre sind in den Spalten "++" und "--" gesondert ausgewiesen.

	1+2		3+4		1+2		3+4	
	+	++	+	++	-	--	-	--
K1	24	9	22	13	31	17	24	17
K2	12	3	6	2	21	4	15	5
K3	17	4	25	7	25	7	23	8
K4	22	5	21	9	25	7	21	8
K5	14	7	10	1	19	7	17	4

Die Darstellung der Weiserjahre auf den einzelnen Flächen (Abb. 4-62) zeigt keine signifikanten Veränderungen in der Anzahl beziehungsweise der Verteilung über den Auswertungszeitraum an. Trägt man die Summen der Jahre im positiven wie im negativen Bereich über der Zeit auf, dann stützt das die Erkenntnis, dass es weder im Verhältnis zwischen einfachen und extremen Weiserjahren noch in der Verteilung über der Zeit signifikante Trends gibt (Abb. 4-63). In einzelnen Jahren (zum Beispiel 1936, 1948, 1981 und 1990) treten durch lokale Unterschiede in den Umweltbedingungen und in den Wuchsreaktionen sowohl positive als auch negative Weiserjahre auf.

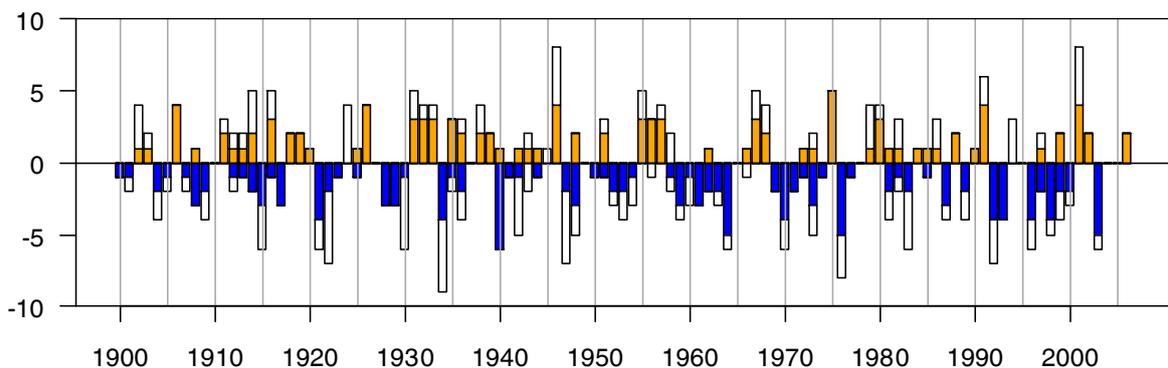


Abb. 4-63: Häufigkeit von Weiserjahren auf den Kernflächen und Verteilung auf den Auswertungszeitraum. Die ausgefüllten Säulen zeigen Extrem-Weiserjahre, die darüber hinausgehenden Säulen zusätzliche einfache Weiserjahre an (vergleiche 3.3.3). Werte über Null stehen für positive, Werte darunter für negative Weiserjahre. Theoretisch möglich ist bei absolut synchronem Auftreten auf allen Flächen sowie in herrschendem wie beherrschtem Bestand ein Maximalwert von +10 beziehungsweise ein Minimalwert von -10.

Die Clusteranalyse für die zehn Zeitreihen zeigt, dass sich die untersuchten Sozialklassen und die einzelnen Kernflächen in unterschiedlichem Maße ähnlich sind (Abb. 4-64). Mit Blick auf den herrschenden und den beherrschten Bestand ist die Distanz zwischen beiden auf K1 am geringsten und auf K5 am größten. In Zusammenfassung aller Probebäume unterscheidet sich K2 deutlich von K1, obwohl sie ihr geographisch am nächsten liegt. Diese Ähnlichkeitsverhältnisse lassen sich auch in den Zeitreihen der positiven Weiserjahre wiederfinden.

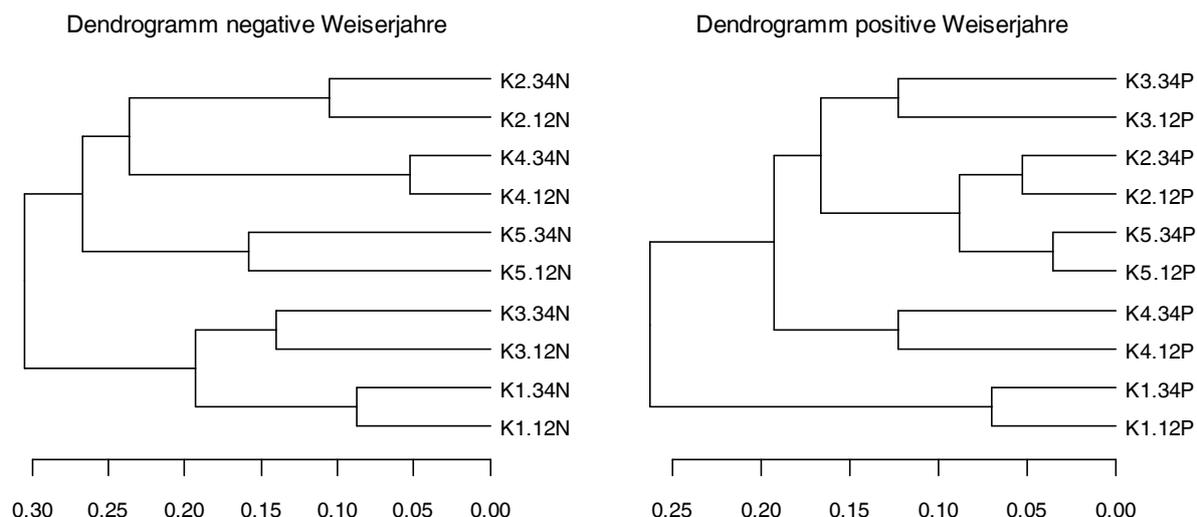


Abb. 4-64: Dendrogramm nach hierarchischer Clusteranalyse zur Feststellung der Ähnlichkeit zwischen den Zeitreihen der einfachen negativen (N; links) und positiven (P) Weiserjahre auf den Flächen K1 bis K5, getrennt nach herrschendem (12) und beherrschtem (34) Bestand. Die Abszisse gibt die GOWER-Distanzen¹ wieder.

Neben der oben dargestellten grafischen Clusteranalyse wurden auch die Werte für den Matching-Koeffizienten (vergleiche 3.3.3 und GOWER 1971) als Ähnlichkeitsmaß berechnet. Er ist (bezogen auf den herrschenden Bestand) für die negativen Weiserjahre mit 0,664 am geringsten zwischen K1 und K5, am höchsten ist die Übereinstimmung bei 0,757 zwischen K1 und K3. Die positiven Weiserjahre im herrschenden Bestand sind am ähnlichsten verteilt auf K2 und K5 (0,859), am größten ist der Unterschied zwischen K1 und K4 (0,664).

Um Aussagen für einen sinnvoll langen Zeitraum zu erhalten, gehen in die Analyse der Weiserjahre auf den Zusatzflächen nur diejenigen Flächen ein, deren Chronologien vor dem Jahr 1950 beginnen. Die Ähnlichkeitsvergleiche auf Basis der Dendrogramme beziehungsweise der Clusteranalyse beziehen sich dann auf den Zeitraum von 1950 bis 2006, der für alle in Frage kommenden Flächen mit Daten abgedeckt ist. Ihre Ergebnisse sind beispielhaft für die (einfach) negativen Weiserjahre in Abb. 4-65 dargestellt.

¹ Die "Distanz" gibt an, wie stark sich die vorgegebenen Cluster (Kernflächen, unterteilt in Sozialklassen) voneinander unterscheiden. Sie berechnet sich – vereinfacht ausgedrückt – aus dem Anteil unterschiedlicher Ausprägungen eines Merkmals in Relation zur Gesamtzahl der Merkmale und steht damit in einem komplementären Verhältnis zum Matching-Koeffizienten, der die Ähnlichkeit quantifiziert.

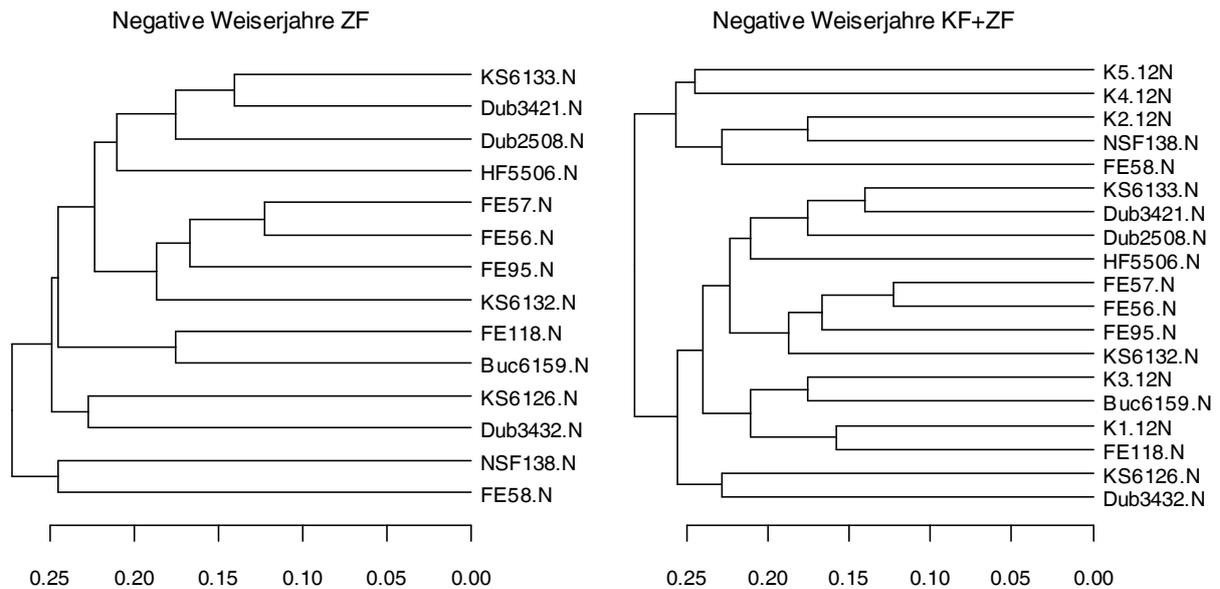


Abb. 4-65: Dendrogramme nach hierarchischer Clusteranalyse für die negativen Weiserjahre (N) in den Jahringindex-Zeitreihen der Zusatzflächen (Abszisse = GOWER-Distanzen). Das Diagramm rechts stellt die Distanzen unter Einbeziehung des herrschenden Bestands (12) der Kernflächen dar.

Die Clusteranalysen belegen, dass die Ähnlichkeitsverhältnisse nicht ausschließlich von der geographischen Nähe bestimmt werden. Zum Teil verlaufen zwar die Weiserjahre in benachbarten Beständen deutlich parallel zueinander (FE56 und FE57, K2 und NSF138, Abb. 4-65). Andere Zeitreihen gleichen jedoch denen von Flächen in größerer Entfernung mehr als denen aus Beständen in unmittelbarer Nachbarschaft (KS6126 und Dub3432, Buc6159 und FE118 beziehungsweise K1). Die eingehendere Betrachtung legt einen zusätzlichen Einfluss des Alters nahe; gerade die zuletzt genannten Flächen befinden sich in jeweils ähnlichen Entwicklungsphasen. Die statistische Wirkung einzelner Faktoren ließe sich eventuell durch Diskriminanzanalysen in größerer Tiefe prüfen. Aus Kapazitätsgründen soll dieser Ansatz aber im hier gegebenen Rahmen nicht weiter verfolgt werden.

Nach den Ähnlichkeitsverhältnissen soll zum Thema Weiserjahre auf den Zusatzflächen auch geklärt werden, ob es Veränderungen ihrer Häufigkeit im Untersuchungszeitraum gegeben hat. Analog zur Darstellung für die Kernflächen (Abb. 4-63) stellt Abb. 4-66 die Verteilung der Weiserjahre im Zeitabschnitt 1950-2006 für die in die Analysen einbezogenen 14 Zusatzflächen dar.

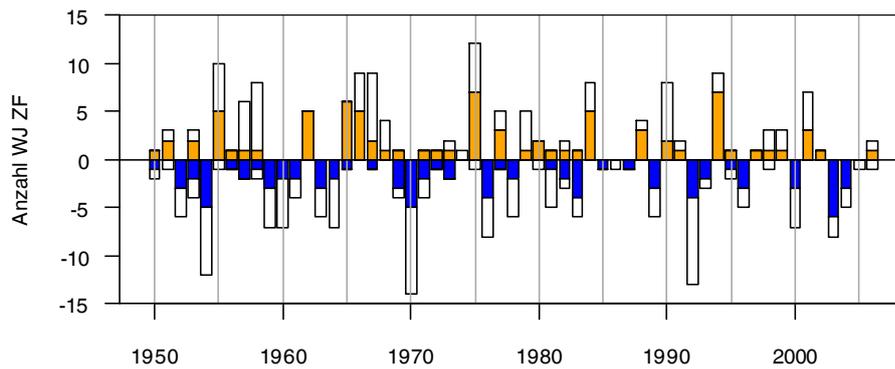


Abb. 4-66: Häufigkeit von Weiserjahren auf 14 Zusatzflächen und Verteilung auf den Auswertungszeitraum 1950-2006. Ausgefüllte Säulen zeigen Extrem-Weiserjahre, darüber hinausgehende zusätzliche einfache Weiserjahre (vergleiche 3.3.3). Werte über Null stehen für positive, Werte darunter für negative Weiserjahre.

Die zusammenfassende Darstellung der Weiserjahrhäufigkeit zeigt wie im Fall der Kernflächen keinen Trend über der Zeit. Im Jahr 1970 weisen alle 14 Flächen Abweichungen nach unten auf, in fünf dieser Bestände geht sogar bei allen Probestämmen der Zuwachs zurück. 1992 gibt es auf 13 und 1954 auf 12 Flächen einfache negative Weiserjahre. Die Jahre 1975 mit zwölf sowie 1955 mit zehn positiven (davon sieben beziehungsweise fünf extremen) Weiserjahren sind hinsichtlich einheitlicher Zuwachsgewinne am auffälligsten. Wie bei den Kernflächen, so gibt es auch hier Jahre (wie 1953, 1973 oder 1982), in denen auf einem Teil der Flächen ein positives, auf anderen ein negatives Weiserjahr zu verzeichnen war.

Die meisten Weiserjahre im Untersuchungszeitraum treten in FE56 und FE118 auf (je 17 negative sowie 13 und 15 positive), auch FE 95 (13/13) und FE58 (14/11) verhalten sich in dieser Hinsicht überdurchschnittlich. Die Differenz zu den Flächen mit dem am wenigsten einheitlichen Verhalten ist nicht besonders groß: Am wenigsten Weiserjahre sind auf den Flächen Dub2508 (9/9) und KS6126 (11/7) zu verzeichnen. Berücksichtigt man die unterschiedliche Länge der betrachteten Perioden, dann liegen diese Zahlen in etwa auf dem Niveau der Kernflächen (Tab. 4-16).

4.3 Quantifizierung der Witterungswirkungen auf den Zuwachs

4.3.1 Witterungsverlauf auf den Versuchsflächen

Im Untersuchungszeitraum zeigten die Witterungsparameter für die untersuchten Bestände ähnliche Verläufe. Die Jahresmittelwerte der Temperatur und die Niederschlagssummen der Klimastationen nach Tab. 3-6 entwickelten sich auf den Kernflächen wie in Abb. 4-67 dargestellt.

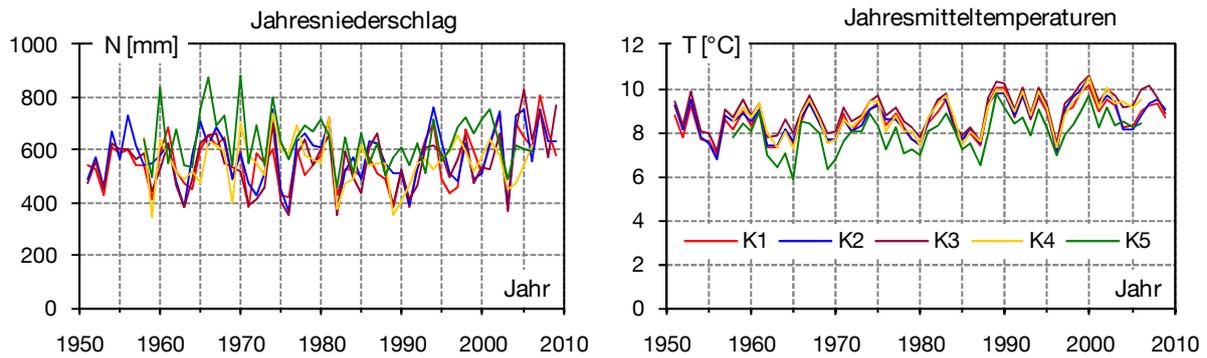


Abb. 4-67: Entwicklung der Jahresniederschlagssummen und der Jahresmitteltemperaturen 1951-2009 auf den Kernflächen K1-K5. Für die polnischen Flächen K4 und K5 waren nur Daten für die Jahre 1958-2006 verfügbar.

Nach den Grafiken zeigt sich überall ein leicht ansteigender Trend besonders für die Jahresmitteltemperaturen, während die Niederschlagsentwicklung trendfrei erscheint. Die höchsten Temperaturen weisen K1, K3 und K4 auf, für K2 und K5 verläuft die Entwicklung auf einem etwas kühleren Niveau. Die Niederschlagssummen verhalten sich deutlich uneinheitlicher, unterscheiden sich aber im mittleren Verlauf nicht wesentlich. Allgemein auffällige Minima im Jahresniederschlag sind 1959, 1982 und 2003 festzustellen, die Jahre 1976 und 1989 sind nur auf den deutschen Flächen als Trockenjahre sichtbar, ohne dass K4 und K5 betroffen sind. Die Entwicklung der Jahreswerte auf den Zusatzflächen zeigt Abb. 4-68.

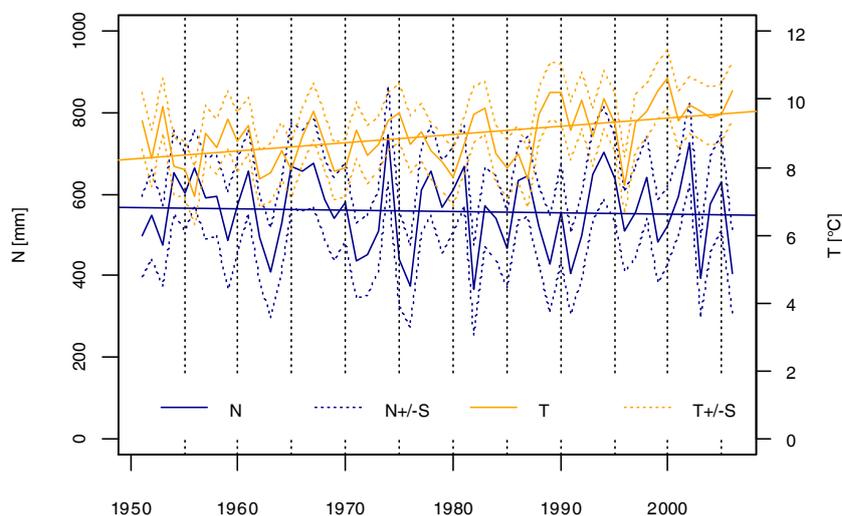


Abb. 4-68: Verlauf der Jahresmitteltemperaturen (T) und der Jahresniederschlagssummen (N) im Mittel der Referenzstationen nach 3.4.1 und Abb. 3-26 in Ostbrandenburg. Neben den Mittelkurven sind die Verläufe zu- beziehungsweise abzüglich der Standardabweichung sowie die linearen Ausgleichsfunktionen über den Zeitraum 1951-2006 dargestellt.

Wie bei den Kernflächen zeigt sich auch für die Jahreswerte der Referenzstationen ein ansteigender Temperaturtrend bei konstantem Niederschlag. Das lineare Modell für die Temperaturentwicklung ergibt einen hochsignifikanten Anstieg ("*slope*") von etwa 0,025 °C pro Jahr beziehungsweise von ungefähr 1,4 °C seit 1951, während der Niederschlag keinen signifikanten Trend über der Zeit aufweist.

Zusätzliche Informationen über den Verlauf und mögliche systematische Veränderungen der Witterungsparameter liefern die in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen Indizes zur Charakterisierung der Kontinentalität (KI) und der Trockenheit (TI). Ihre Entwicklung über den mit Klimadaten abgedeckten Zeitraum seit 1951 (K4 und K5: 1958) ist in Abb. 4-69 dargestellt. Niedrige KI-Werte zeigen eine vergleichsweise geringe Kontinentalität an, niedrige TI-Werte stehen für Trockenjahre.

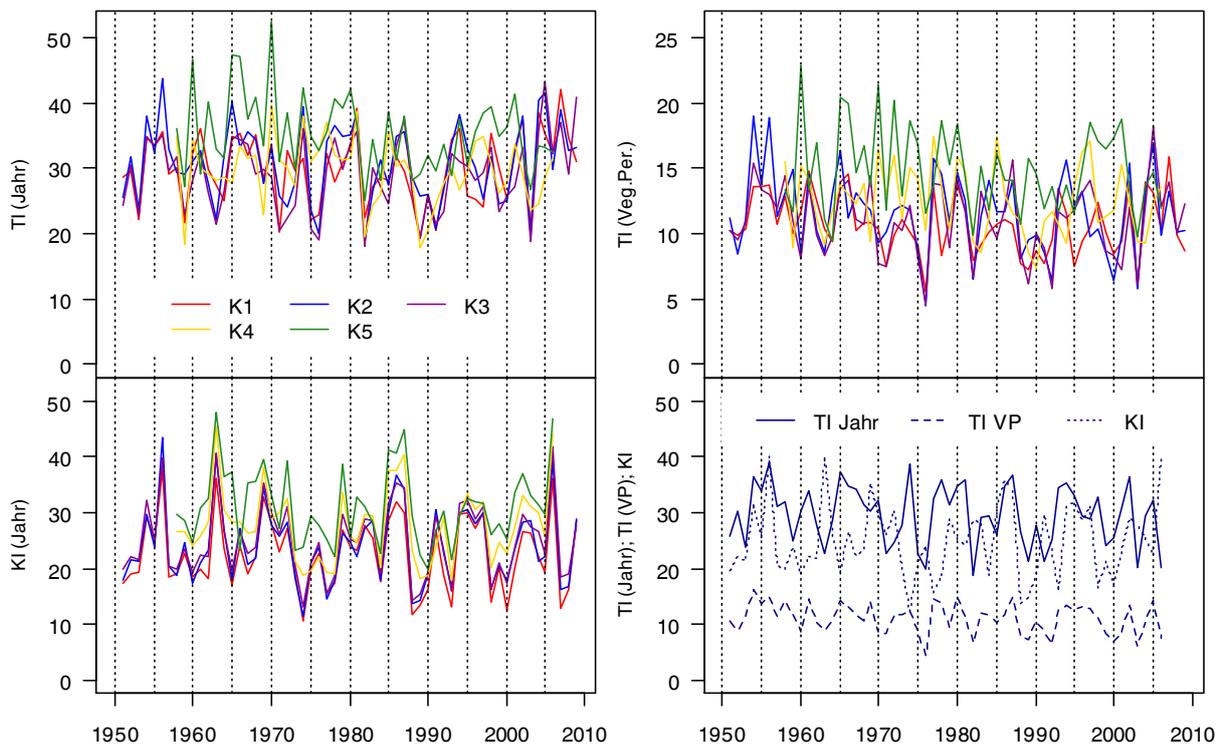


Abb. 4-69: Entwicklung des Trockenheitsindex TI nach DE MARTONNE (1926) als Jahreswert (oben links) beziehungsweise mit Bezug auf die Zeit 01.04.-31.08. ("VP"; oben rechts) sowie des Kontinentalitätsindex KI nach GORCZYNSKI (1920) (unten links) auf den Kernflächen. Das Diagramm unten rechts zeigt die Indizes in ihrem Verlauf nach den Witterungsdaten im Mittel der Referenzstationen in Süd- und Ostbrandenburg. Die absoluten Werte des TI sind zwischen Jahresbezug und Vegetationsperiode wegen unterschiedlicher Definitionsbereiche nicht direkt vergleichbar.

In der Entwicklung der Witterungsindizes ist im Gegensatz zur Temperaturentwicklung kein statistisch signifikanter Trend vorhanden. Einzelne Jahre treten deutlich als Trockenjahre mit besonders geringen TI-Werten hervor (1959, 1982, 2003), hinsichtlich der Vegetationsperiode fallen vor allem die Jahre 1976 und 2003 auf, in denen sich die Zeitreihen der Kernflächen sowie der Referenzstationen parallel verhalten. Der Kontinentalitätsindex KI spiegelt in der Schichtung der Kurven die Lage der Versuchsflächen wider: Die niedrigsten Werte weist K1 auf, dann folgen die Flächen K2 und K3, während sich K4 und vor allem K5 deutlich kontinentaler verhalten. Statistisch sind die Zeitreihen der beiden Indizes voneinander unabhängig (keine signifikanten Korrelationen), die paarweise Gleichläufigkeit zwischen den Jahreswerten von KI und TI liegt in der Regel bei unter 50 Prozent. Auffällig sind die sehr hohen KI-Werte in den Jahren 1963, 1987 und 2006, in denen es damit sowohl tiefe

Wintertemperaturen als auch heiße Sommer gegeben hat. Die vom TI ausgewiesenen Trockenjahre weisen in der Regel keine auffälligen KI-Werte auf. Die mittleren Verläufe der Referenzstationen sind denen der Station bei K3 sehr ähnlich.

4.3.2 Beziehungen zwischen Witterungs-Jahreswerten und Jahrringbreiten

Der folgende Abschnitt stellt die Ergebnisse von Korrelationsanalysen zwischen den Abweichungen von Temperatur und Niederschlag von ihren langjährigen Mittelwerten sowie den Jahrringindex-Werten dar. Auch die Zeitreihen der Trockenheits- und Kontinentalitätsindizes (siehe oben) werden in Beziehung zum Zuwachs gesetzt. Dies erfolgt getrennt für die Flächen K1-K5 und für die Zusatzflächen (zum Bezug der Witterungsdaten siehe Abschnitt 3.4.1, Seite 85).

Die Beziehungen zwischen den Abweichungen der Jahresniederschlagssummen (dN) und Jahrringindexwerten auf den Kernflächen sind in Abb. 4-70 beispielhaft für die Bohrkernproben aus dem herrschenden Bestand dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten liegen bis auf K1 auf allen Flächen unter der Signifikanzschwelle, die Beziehungen sind demnach für eine modellhafte Abbildung nicht geeignet. Im Falle der Jahresmitteltemperaturdifferenzen bestehen auf keiner Fläche statistisch signifikante Korrelationen zum Jahrringindex.

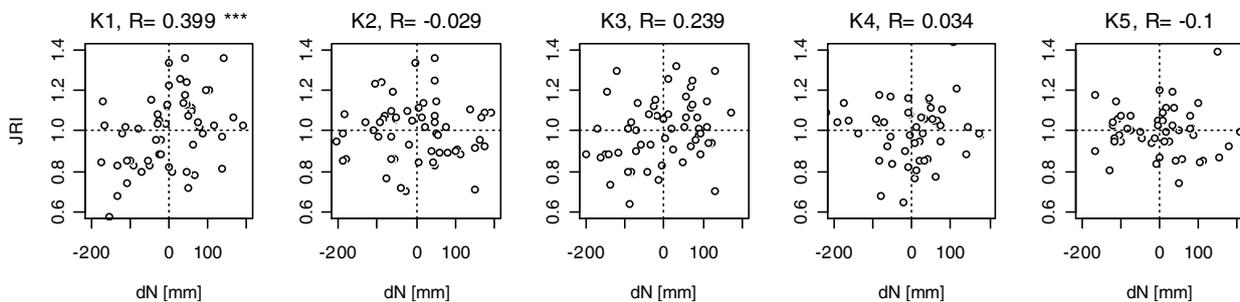


Abb. 4-70: Beziehungen zwischen Jahrringindex (JRI) und Abweichung der Jahresniederschlagssumme (dN) vom langjährigen Mittel für die Kernflächen (herrschender Bestand) im Zeitraum 1951-2006

Die beiden Sozialklassen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Beziehungen zu den Witterungs-Jahreswerten nicht voneinander: Die einzige signifikante Korrelation besteht zwischen den Jahrringindexwerten des beherrschten Bestandes auf K1 und der Abweichung des Jahresniederschlags, alle anderen Beziehungen sind statistisch rein zufälliger Art. Interessant ist die relativ enge Bindung an den Niederschlag gerade für K1 und – wenn auch nicht signifikant – für K3, denn beide Flächen sind von der Clusteranalyse hinsichtlich ihrer negativen Weiserjahre als einander am ähnlichsten ausgeschieden worden. Außerdem zeigen ihre Jahrringindex-Zeitreihen ähnliche, sich von K2 und K5 abgrenzende Muster wie eine relativ hohe Gleichläufigkeit, die auf eine vergleichsweise straffe Kopplung an externe Einflüsse hinweist (siehe 4.2.5).

Die Beziehungen zwischen den Witterungsindizes und den Jahrringindexwerten der Kernflächen ergeben ein ähnliches Bild wie im Fall der Niederschlags-Jahreswerte. Statistisch signifikant sind lediglich die Korrelationen zwischen beiden Sozialklassen und dem Trockenheitsindex TI auf K1, auf K3 unterschreiten die Korrelationskoeffizienten knapp die Signifikanzschwelle (Abb. 4-71)¹. Die schon für die Jahresniederschläge festgestellte größere Abhängigkeit der Zuwachsraten auf K1 und K3 von der Witterung bestätigt sich somit auch hier. Kennzeichnend ist außerdem der stärkere Einfluss des "Wasserfaktors", das heißt der Niederschlagsverhältnisse beziehungsweise der Wasserverfügbarkeit im Vergleich mit den Temperaturen.

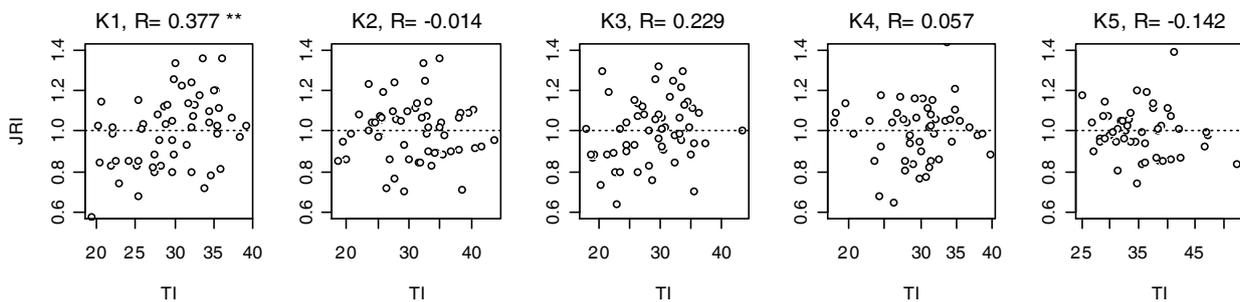


Abb. 4-71: Beziehungen zwischen Jahrringindex (JRI) und Trockenheitsindex (TI) auf das Gesamtjahr bezogen für die Kernflächen (herrschender Bestand) im Zeitraum 1951-2006

Die ausschließlich für die Vegetationsperiode berechneten TI-Werte sind noch schwächer mit den Zuwachsraten korreliert, auch bei versuchsweiser Verschiebung der Jahrringindex-Zeitreihe um ein Jahr vergrößerten sich in keinem Fall die Korrelationskoeffizienten. Zwischen den Werten des Kontinentalitätsindex und den Jahrringindizes ergaben sich keinerlei signifikante Beziehungen.

Auf den Zusatzflächen, von denen wegen ungenügenden Alters drei hier nicht untersucht wurden, liegen ähnlich schwache Korrelationen zwischen Jahres-Witterungswerten und den Jahrringindizes vor. Nur auf einer Fläche (FE118) ist die Beziehung zwischen Jahresniederschlägen und Zuwachsraten statistisch signifikant, für die Jahresmitteltemperatur ergeben sich noch niedrigere und durchweg nicht signifikante Korrelationskoeffizienten (Abb. 4-72).

¹ Höhere TI-Werte zeigen geringere Trockenheit an und umgekehrt (vergleiche 3.4.1, Seite 86).

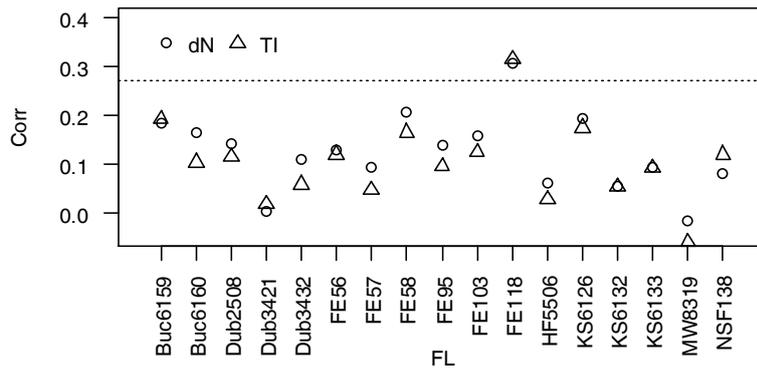


Abb. 4-72: Korrelationskoeffizienten (Corr) zwischen den Jahrringindexwerten der Zusatzflächen (FL) und der Abweichung der Jahresniederschläge vom langjährigen Mittel (dN) sowie dem Trockenheitsindex (TI). Die durchbrochene waagerechte Linie bezeichnet die Signifikanzschwelle ($\alpha = 0,05$).

Die Analyse des Zusammenhangs zwischen Witterungsindizes und Zuwachsraten bestätigt die bis hierhin gewonnenen Erkenntnisse. Der Trockenheitsindex ist in seiner Beziehung zu den Jahrringindexwerten vergleichbar mit den Jahresniederschlagssummen (Abb. 4-72), während die Abweichung der Mitteltemperaturen vom langjährigen Mittel sowie der jährliche Kontinentalitätsindex keine statistisch signifikanten Beziehungen zum Zuwachs aufweisen. Auch ein lineares Modell mit den Niederschlags- und den Temperaturdifferenzen als Prädiktoren zeigte in keinem Fall ein signifikantes Bestimmtheitsmaß, die Zusammenhänge zwischen kombinierten Jahreswitterungsparametern und Zuwachsraten sind somit für die einbezogenen 17 Zusatzflächen statistisch als rein zufällig einzuordnen.

4.3.3 Beziehungen zwischen Witterungs-Monatswerten und Jahrringbreiten

Die Zusammenhänge zwischen Monatswerten von Temperatur und Niederschlag und den Jahrringindex-Zeitreihen werden anhand der absoluten Witterungswerte und der Jahrringindex-Zeitreihen geprüft. Die Quantifizierung mit Hilfe des "R"-package "bootRes" erfolgt zum einen für das gesamte gemeinsam abgedeckte Intervall, zum anderen für wandernde Zeitfenster von 28 Jahren Länge (siehe bootRes, Seite 92).

Auf der ersten Ergebnisebene werden die Einflüsse der Witterungs-Monatswerte auf den Jahrringindex für das gesamte untersuchte Zeitfenster (*common interval*, "CIN") grafisch und tabellarisch zusammengestellt. Abb. 4-73 zeigt die Koeffizienten der Korrelation mit den monatlichen Niederschlagssummen für beide Sozialklassen auf den Kernflächen, Abb. 4-74 stellt die Beziehungen zwischen den Jahrringindexwerten und den Witterungsvariablen für die wegen ihrer langen Zeitreihen ausgewählten Zusatzflächen dar (siehe 3.4.3). Die Monate mit signifikanten Korrelationskoeffizienten sind jeweils farblich hervorgehoben. Einen vollständigen Überblick über die statistischen Beziehungen für Temperatur und Niederschlag einschließlich der *response-function*-Werte für alle mit bootRes untersuchten Jahrringindex-Zeitreihen enthält die Tabelle im Anhang 8.9.

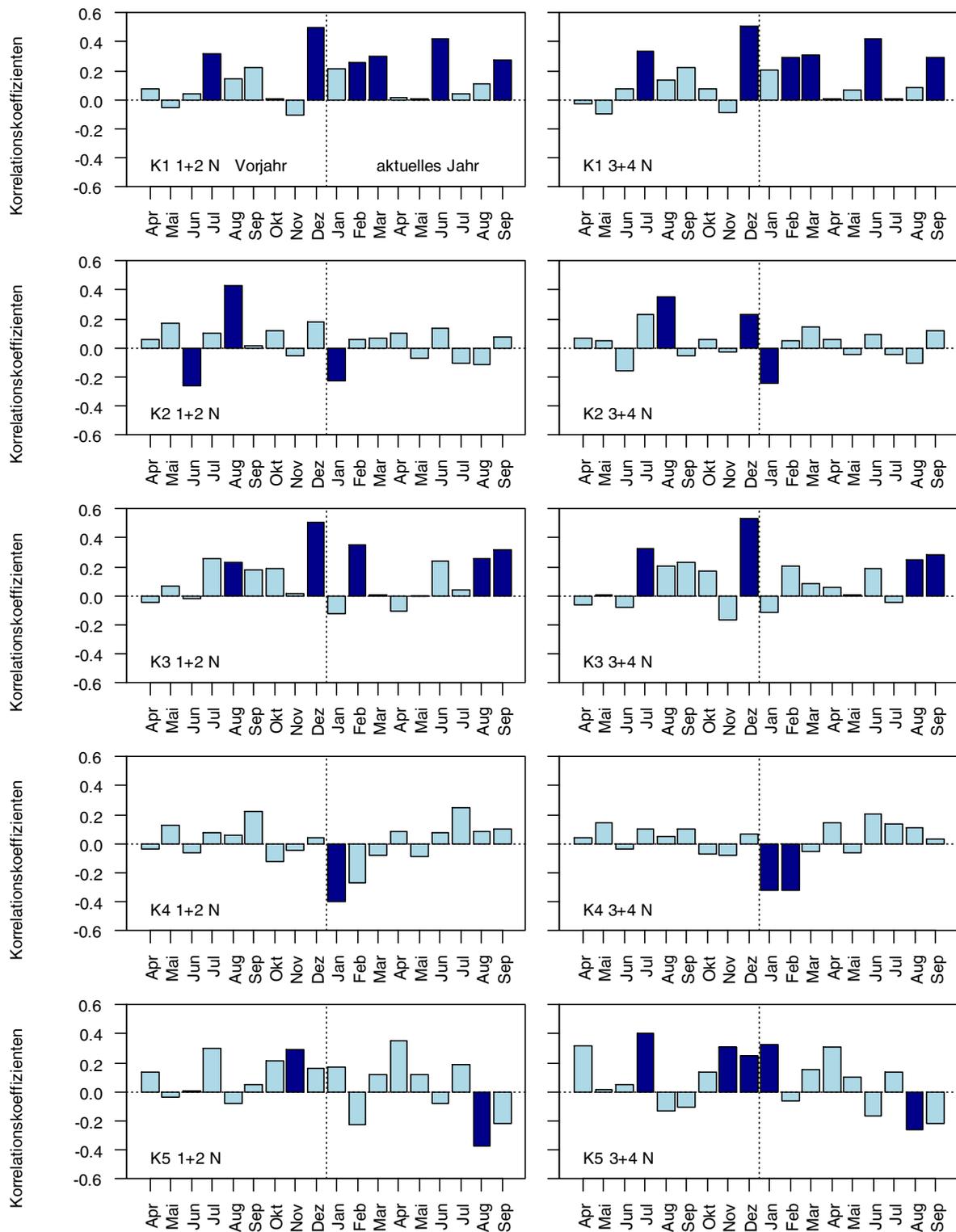


Abb. 4-73: Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen monatlichen Niederschlagssummen (N) und dem Jahrringindex auf den Kernflächen für den Zeitraum 1951-2006 (CIN), berechnet mit *bootRes* (ZANG 2009), für den herrschenden Bestand (1+2, links) und den beherrschten Bestand (3+4, rechts). Signifikante Korrelationskoeffizienten sind dunkelblau hervorgehoben.

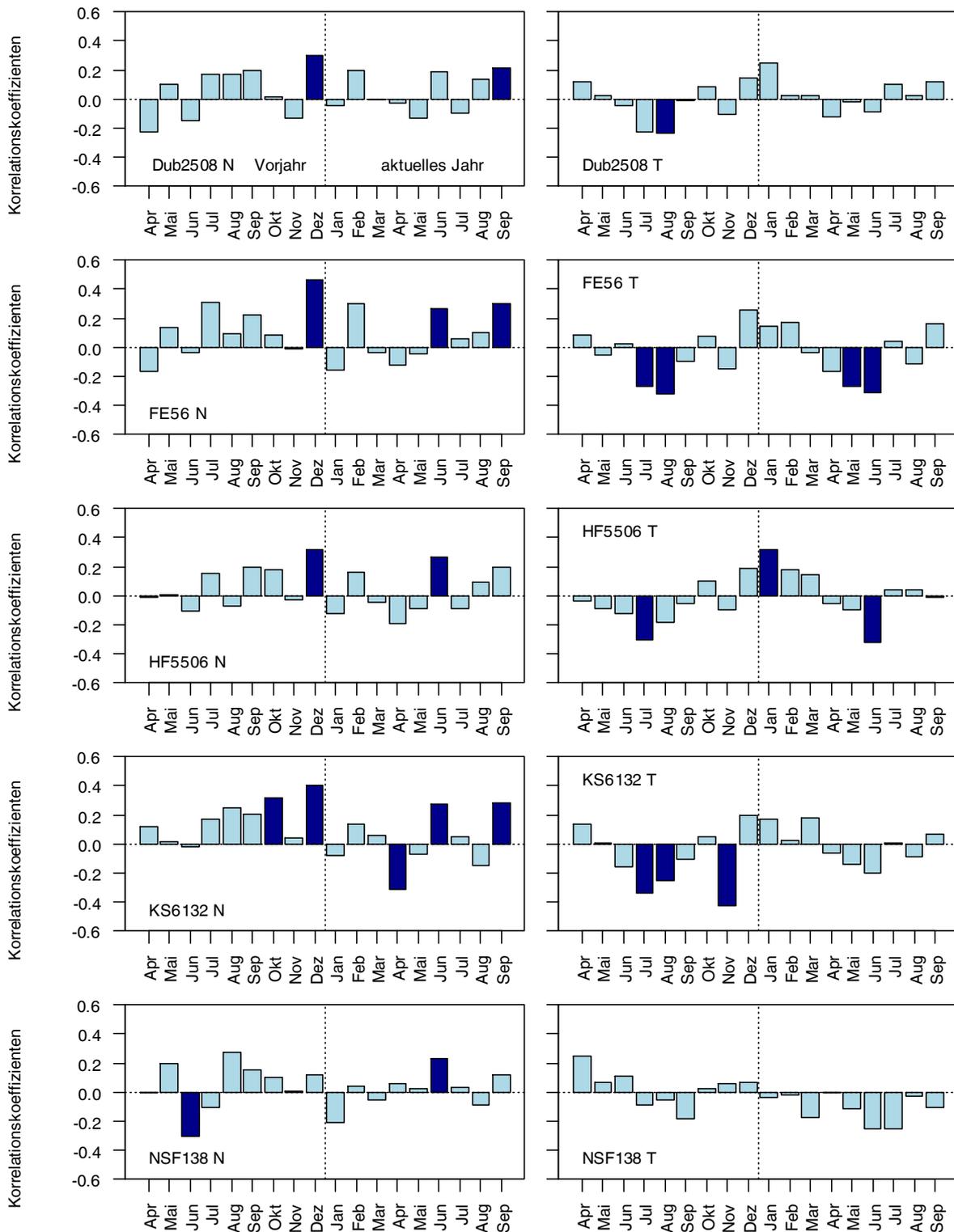


Abb. 4-74: Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen monatlichen Niederschlagssummen (N, links) beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen (T, rechts) und dem Jahrringindex auf ausgewählten Zusatzflächen in den Revieren Dubrow (Dub2508), Fünfeichen (FE56), Hirschfelde (HF5506), Kleinsee (KS6132) und Neusorgefeld (NSF138) für den Zeitraum 1951-2006 (CIN). Signifikante Korrelationskoeffizienten sind dunkelblau hervorgehoben.

In Auswertung der vorangegangenen Abbildungen fallen charakteristische Unterschiede beziehungsweise Ähnlichkeiten in der Sequenz der Kernflächen von West nach Ost auf, die

schon auf der Skalenebene jahresbezogener Witterungsinformationen zu beobachten waren. Die Flächen K1 und K3 zeigen ein ähnliches Muster in der Wirkung einzelner Monate: Höhere Jahrringindizes ergeben sich hier nur bei überdurchschnittlichen Niederschlägen, die vor allem in den Wintermonaten von Bedeutung sind. Auch Niederschläge im Spätsommer bis Frühherbst des Wuchsjahres sind auf beiden Flächen signifikant positiv mit dem Jahrringindex korreliert, auf K1 zusätzlich noch die Juni-Niederschläge. Im Vergleich dazu sind die Zusammenhänge auf den übrigen Kernflächen weniger straff. K2 und K4 ist die signifikant negative Korrelation der Niederschläge im Januar gemeinsam, auf K2 sind zusätzlich hohe Juli-Niederschläge im Vorjahr mit überdurchschnittlichen Jahrringindexwerten gekoppelt. K5 wiederum zeichnet sich durch eine etwas schwächere, aber meist positive Wirkung höherer Niederschläge vor allem im Spätherbst und Winter des Vorjahres aus, lediglich im Spätsommer des Wuchsjahres sind – im Gegensatz zu K1 und K3 – unterdurchschnittliche Niederschläge förderlich für den Jahrringindex.

Herrschender und beherrschter Bestand zeigen kaum Unterschiede in der Reaktion des Jahrringindex auf die Niederschlagssummen, bis auf K3 sind für die Sozialklasse 3+4 mindestens ebenso viele signifikant korrelierte Monate zu beobachten wie für die Sozialklasse 1+2. Dies gilt in ähnlicher Weise auch für die in Anhang 8.7 ausführlich dargestellten Beziehungen zur Temperatur, die generell zwar etwas schwächer ausgeprägt sind, aber die gleiche Flächenrangfolge in der Zuwachsrelevanz der Witterung ergeben. Danach sind auf allen Flächen vor allem kühle Spätfrühlings- und Frühsommermonate mit überdurchschnittlichen Jahrringindizes verbunden, mit geringerer Signifikanz auch milde Dezember. Am deutlichsten zeigt sich der Einfluss der Temperatur auf den Jahrringindex auf K1 und K3, etwas weniger deutlich auf K4 und K5, während für K2 keine signifikanten Korrelationen zu verzeichnen sind.

Bei den Zusatzflächen sind sich vor allem die im mittleren Teil Brandenburgs gelegenen Bestände Dub2508, FE56 und HF5506 ähnlich in Richtung und Stärke der festgestellten Korrelationen (Abb. 4-74). Die südöstliche Fläche KS6132 zeigt davon etwas abweichende Reaktionsmuster ebenso wie die südwestliche NSF138, die die am wenigsten straffen Zusammenhänge aufweist. Insgesamt bestätigen sich die für die Kernflächen K1, K2 und K3 gefundenen Beziehungen: Überdurchschnittliche Jahrringindizes sind mit hohen Niederschlägen, vor allem im Winter und Frühsommer, sowie mit unterdurchschnittlichen Temperaturen hauptsächlich in der Vegetationsperiode verbunden. Gemessen an den Korrelationskoeffizienten sind die Wirkungen der Niederschläge etwas stärker als die der Monatsmitteltemperaturen.

Die Beziehungen zwischen den Monatswerten beider Witterungsgrößen und dem Jahrringindex für alle Kernflächen fasst Abb. 4-75 zusammen. Auch an diesem Diagramm lässt sich komplementäre Wirkung von Temperatur und Niederschlag gut ablesen: Während fast alle signifikanten Korrelationskoeffizienten für die Mitteltemperaturen negativ sind und in Frühjahrs- und Sommermonaten auftreten, ist ihr Vorzeichen im Fall der Niederschlagssummen bis auf wenige Ausnahmen positiv. Ähnliche Muster sind auf den Zusatzflächen zu

beobachten (siehe Anhang 8.10); dort zeigt die der Kernfläche K2 benachbarte Fläche NSF138 ebenso wie diese keinerlei signifikanten Korrelationen zwischen Temperaturen und Jahrringindex.

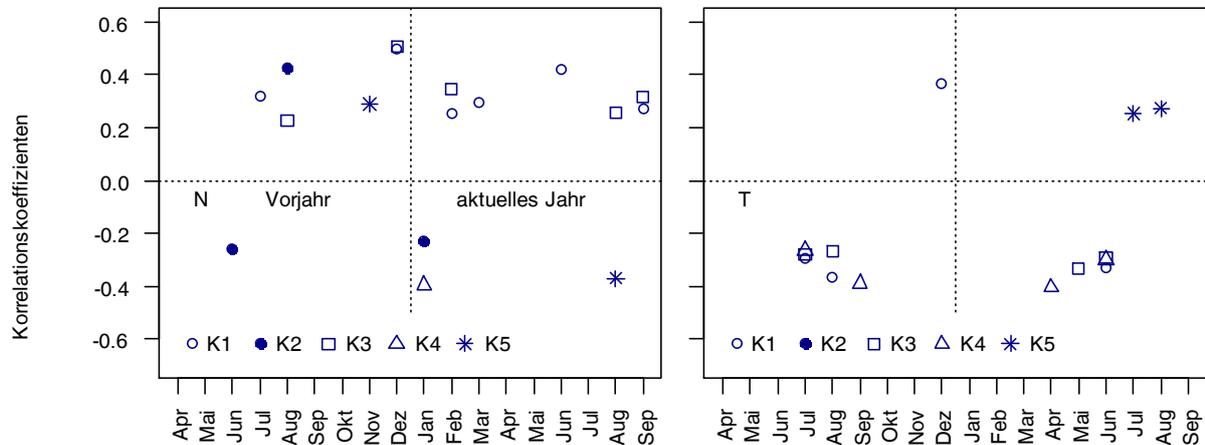


Abb. 4-75: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen Monatswerten von Niederschlag (N, links) und Temperatur (T) im Zeitraum 1951-2006, dargestellt für die Sozialklasse 1+2 auf den Kernflächen

Die bis hierhin dargestellten Zusammenhänge beziehen sich auf die gesamte Periode 1951-2006 (CIN). Zur Erfassung möglicher Veränderungen der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen in diesem Zeitraum werden im Folgenden die Korrelationskoeffizienten¹ in *moving windows* untersucht. Die grafische Darstellung der Beziehungen in diesen gleitenden Intervallen erfolgt in Diagrammen analog zu der im Methodikteil auf Seite 93 dargestellten Abb. 3-29, wie sie sich aus `bootRes` ableiten lassen. In Ergänzung zu der bereits in Abb. 3-29 ausgewerteten Fläche K1 werden als Beispiele für die Analyseergebnisse die im Osten gelegene Kernfläche K3 und die Zusatzfläche KS6132 im südöstlichen Brandenburg ausgewählt, jeweils in der Beziehung ihrer Jahrringindizes zu den Monatsniederschlägen. Die Länge der *moving windows* beträgt ebenfalls 28 Jahre. Eine für alle Korrelationskoeffizienten gültige Signifikanzschwelle kann nicht angegeben werden, da gemäß dem von ZANG & BIONDI (2012) in `bootRes` umgesetzten *bootstrapped*-Ansatz von BIONDI & WAIKUL (2004) die Konfidenzintervalle nach 1000 Durchläufen auf Basis von "Ziehung mit Zurücklegen" als Kriterium für die statistische Bedeutsamkeit der Zusammenhänge genutzt werden.

¹ Da es hier eher auf die Darstellung möglicher Differenzen zwischen Beginn und Ende des Untersuchungszeitraumes ankommt und die *response-function*-Koeffizienten – bei etwas niedrigeren Werten – grundsätzlich den gleichen Trends folgen wie die Korrelationskoeffizienten, wird auf ihre grafische Darstellung hier verzichtet.

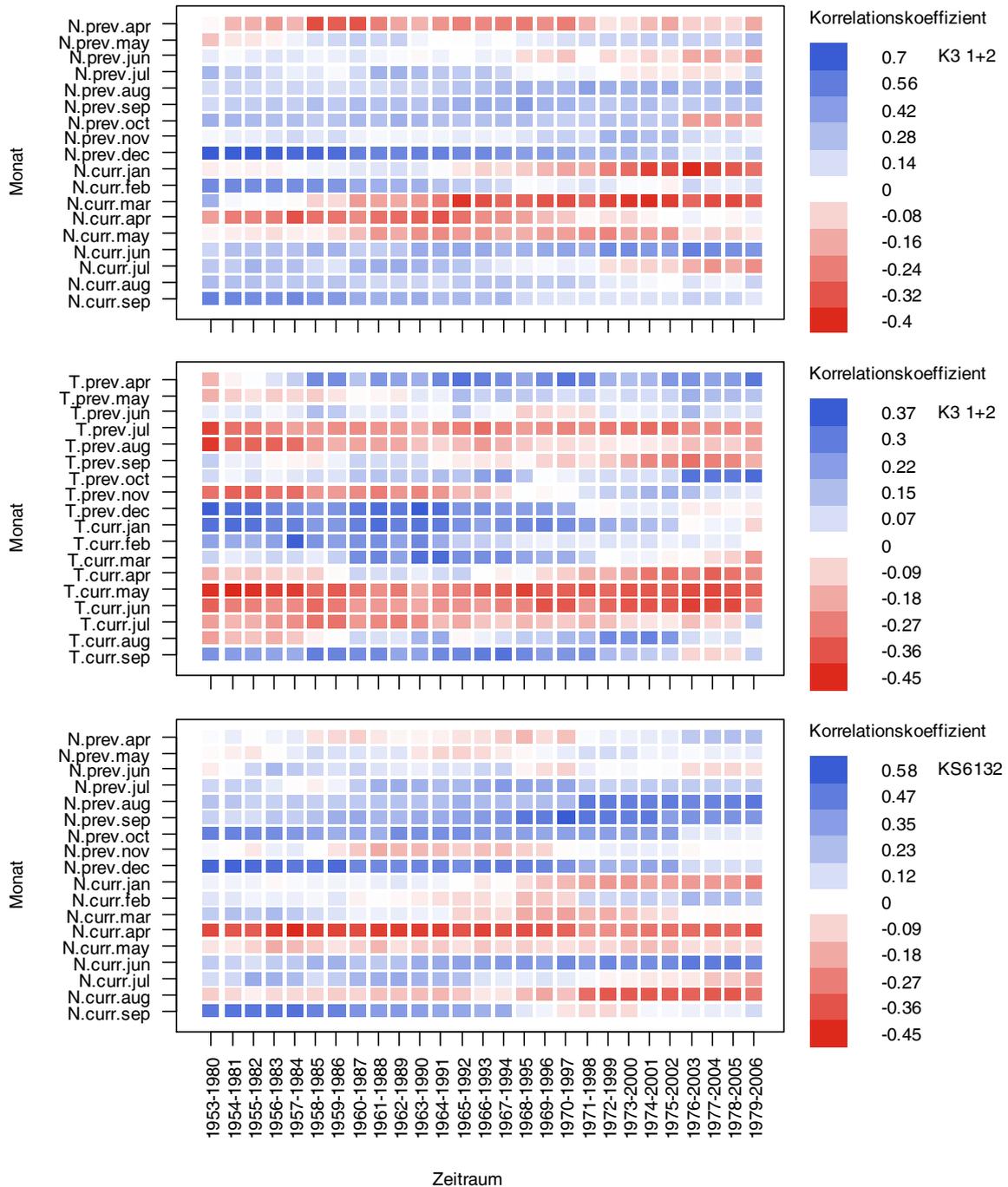


Abb. 4-76: Korrelationskoeffizienten zwischen den Monats-Niederschlagssummen (N) beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen (T) vom April des Vorjahres (prev.apr) bis zum September des aktuellen Jahres (curr.sep) und dem Jahrringindex für den herrschenden Bestand auf der Kernfläche K3 (Diagramme oben und Mitte) sowie für die Zusatzfläche KS6132. Die Abszisse zeigt die Ergebnisse in den durch "moving windows" untersuchten Teilzeiträumen des gesamten Datenbereichs von 1951-2006.

Die beispielhaften Diagramme zeigen, dass sich die Wirkungen einzelner Monate im Verlauf der Zeit teilweise deutlich verändern. So wird zum Beispiel die zu Beginn der Untersuchungsperiode signifikant positive Korrelation der Dezemberrniederschläge mit dem Jahrringindex auf K3 zur Gegenwart hin immer schwächer bis hin zu nur noch unwesentlichen

Einflüssen, während sich die negative Wirkung hoher Sommertemperaturen im Vorjahr stetig verstärkt, bis sie für August und September im letzten 28-Jahres-Intervall signifikant wird. Auch K1 (siehe Abb. 3-29) zeigt diesen Zusammenhang, während dort die Dezemberrniederschläge in konstanter Stärke negativ korreliert bleiben. Die durchgängig negative Korrelation der Mai- und Juni-Temperaturen des Wuchsjahres mit dem Jahrringindex auf K3 korrespondiert mit der zunehmenden Bedeutung überdurchschnittlicher Juni-Niederschläge, die auch auf K1 sowie auf der Zusatzfläche KS6132 gegen Ende der Gesamtperiode deutlich statistisch signifikant wird. Auffällig ist weiterhin, dass die Korrelationskoeffizienten die höchsten Werte für positive Beziehungen der Monatsniederschläge zum Jahrringindex annehmen. Negative Korrelationen der Niederschläge sowie allgemein der Monatsmitteltemperaturen zeigen generell etwas niedrigere Koeffizienten.

Die hier nicht dargestellten Koeffizienten der *response-functions* liegen im Betrag in der Regel etwas unter den Korrelationskoeffizienten und sind seltener signifikant, zeigen hinsichtlich der Monatswirkungen auf den Jahrringindex aber vergleichbare Muster. Der einzige Zusammenhang, der sich auf K1 und K3 wie auch auf KS6132 während des Fortschreitens der gleitenden Intervalle von Insignifikanz zu statistischer Bedeutsamkeit entwickelt, ist der positive Effekt der Juni-Niederschläge. Auf K2 sind in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums anstelle der Juni die Juli-Niederschläge positiv signifikant, auf K4 die Januar- und auf K5 die November-Niederschläge des Vorjahres, für alle anderen Monate sind die *response*-Koeffizienten zwischen Niederschlag und Jahrringindex statistisch als zufällig einzuordnen. Auf den Zusatzflächen tritt der für KS6132 beobachtete signifikante Effekt der Juni-Niederschläge auch auf Dub2508, FE56 und HF5506 auf. Im Fall von Dub2508 ist zusätzlich der Juli, auf NSF138 ausschließlich der August des Vorjahres signifikant positiv mit dem Jahrringindex gekoppelt.

Die Darstellung aller analysierten Beziehungen zwischen den beiden Witterungsparametern und den Jahrringindizes auf allen Flächen nach dem Muster der Abb. 4-76 würde zu viel Raum einnehmen. Um die Ergebnisse möglichst übersichtlich aufzubereiten, konzentriert sich die Auswertung deshalb im Folgenden nur auf den Beginn des CIN und sein Ende. Dazu werden jeweils die Werte der ersten fünf und die der letzten fünf 28-Jahres-Intervalle gemittelt – insgesamt betrifft das also die Perioden 1951-1983 sowie 1974-2006 (siehe 3.4.3, Seite 94)¹. Die Signifikanz der Koeffizienten leitet sich ab aus den ebenfalls gemittelten Grenzen der Konfidenzintervalle: Ist das Mittel der unteren Grenzen der jeweils fünf Konfidenzintervalle größer als Null, dann ist der Korrelationskoeffizient signifikant positiv, ist das Mittel der oberen Grenzen kleiner als Null, ist er signifikant negativ. Die Ergebnisse der Analysen sind beispielhaft für den herrschenden Bestand der Kernflächen in Abb. 4-77 zusammengefasst.

¹ In die Auswertungen gingen die Mittelwerte der ersten fünf und der letzten fünf 28-Jahres-Intervalle ein. Da der Modellzeitraum auf Grund der Berücksichtigung von Vorjahresmonaten jeweils erst um ein Jahr verzögert einsetzt (zum Beispiel beginnt die Analyse der ersten 28 Jahre zwar schon 1951, dauert aber bis 1979), decken die fünf ersten Intervalle zusammen die Periode 1951-1983, die letzten die Periode 1974-2006 ab.

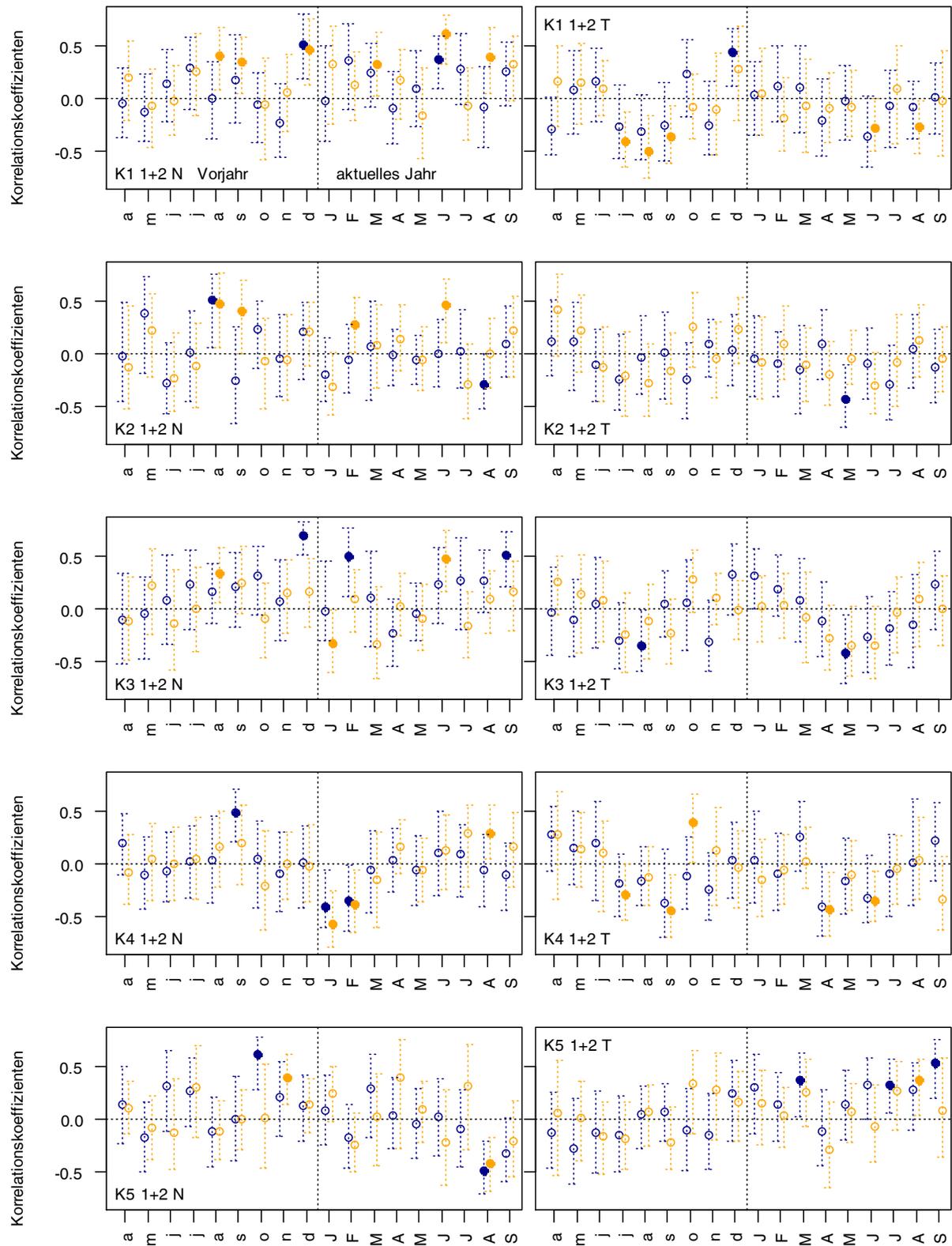


Abb. 4-77: Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen monatlichen Niederschlagssummen (N, links) beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen (T, rechts) und dem Jahrringindex auf den Kernflächen, dargestellt für den herrschenden Bestand (Sozialklasse 1+2), in den Zeiträumen 1951-1983 (dunkelblau) und 1974-2006 (orange). Die senkrechten Linien geben die Konfidenzintervalle an; ausgefüllte Punkte bezeichnen signifikante, nicht ausgefüllte Punkte nicht signifikante Korrelationskoeffizienten. Auf der Abszisse zeigen Kleinbuchstaben die Monate des Vorjahres (April bis Dezember), Großbuchstaben die des Wuchsjahres an.

Die Abb. 4-77 legt Verschiebungen in der Häufigkeit signifikanter Korrelationen zwischen Witterung und Jahrringindex innerhalb des Untersuchungszeitraums nahe, die von Fläche zu Fläche unterschiedlich ausfallen. Um diese Differenzen deutlicher zu machen, zeigen die folgenden Diagramme nur noch die signifikant von Null abweichenden Korrelationskoeffizienten, getrennt nach Wirkungen der Niederschläge und der Temperatur (Abb. 4-78).

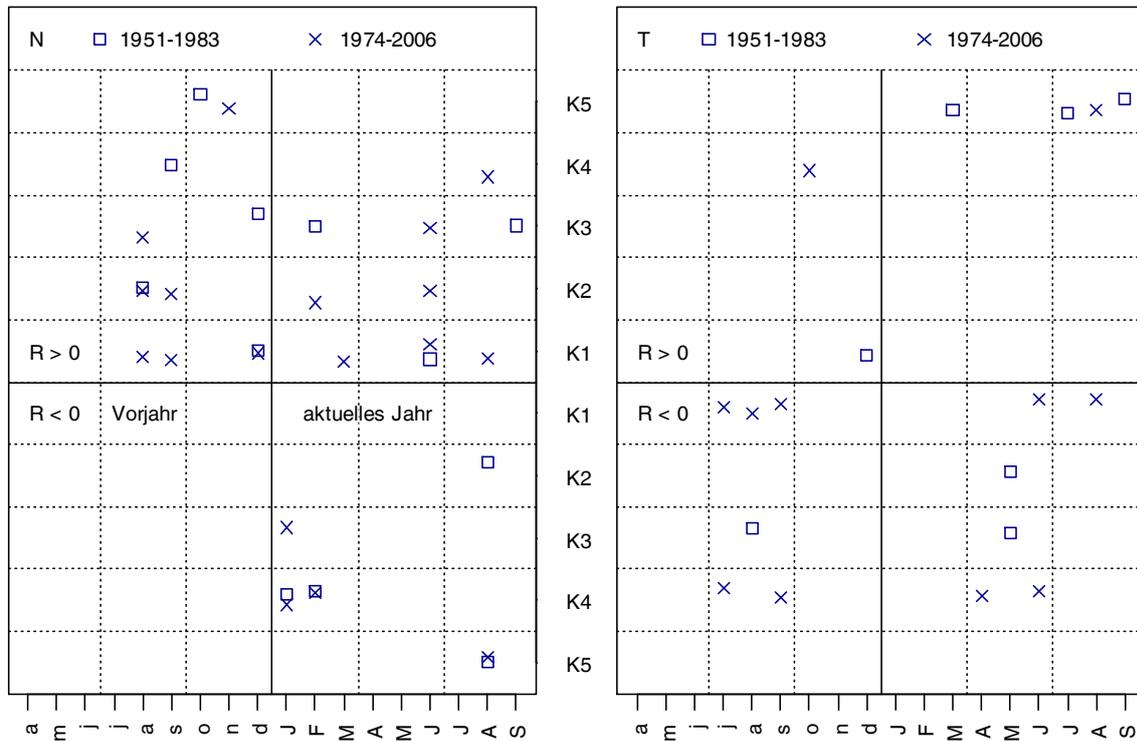


Abb. 4-78: Statistisch signifikante *bootstrapped*-Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen Monatswerten von Niederschlag (N) und Temperatur (T) und dem Jahrringindex, berechnet in gleitenden 28-Jahres-Intervallen, dargestellt für die Sozialklasse 1+2 auf den Kernflächen. Unterhalb der waagerechten Trennlinie sind negative, oberhalb positive Korrelationskoeffizienten aufgetragen. Kleinbuchstaben auf der Abszisse stehen für die Monate April-Dezember des Vorjahres, Großbuchstaben für die Monate Januar-September des Wuchsjahres. Die unterschiedlichen Symbole dienen zur Unterscheidung des Mittels der ersten fünf (1951-1983) vom Mittel der letzten fünf Intervalle (1974-2006), die Lage der Symbole innerhalb der Zeilen gibt ihren Wert zwischen 0 und 1 beziehungsweise zwischen 0 und -1 wieder.

Von 1951-1983 zu 1974-2006 haben vor allem auf K1 und K4 die Zahlen der signifikanten Korrelationen deutlich zugenommen. Auf K1 äußert sich das in sechs (1974-2006) gegenüber zwei (1951-1983) positiven Zusammenhängen zwischen Monatsniederschlägen und Jahrringindex, für Monatsmitteltemperaturen ergeben sich ebenfalls sechs – in diesem Fall negative – Korrelationen für die zweite Periode, während in der ersten noch keine einzige gegeben war. K4 zeigt in beiden Zeiträumen sehr ähnliche Beziehungen zum Niederschlag, signifikante Korrelationen zur Temperatur treten jedoch nur in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums auf. Vier davon sind negativ, eine positiv. Für K2 ist auffällig, dass sich 1974-2006 vier positive Beziehungen zum Niederschlag im Vergleich zu vorher nur

einer positiven und einer negativen ergeben. Die anderen Flächen zeigen keine auffälligen Veränderungen in der Häufigkeit und Richtung der signifikanten Korrelationen. In der Zusammenfassung aller Flächen ergeben sich für die zweite Untersuchungsperiode deutlich mehr statistisch bedeutsame Zusammenhänge als in der ersten, außerdem steigt der Anteil positiver Korrelationen mit dem Niederschlag und negativer Korrelationen mit der Temperatur (siehe Tab. 4-17). In ähnlicher Form gilt dies auch für den beherrschten Bestand und die ausgewählten Zusatzflächen, die ausführlich im Anhang 8.12 dargestellt sind.

Tab. 4-17: Anzahl signifikanter Korrelationen zwischen Jahrringindex und Monatswerten von Temperatur und Niederschlag in positiver (+) und negativer (-) Richtung auf den Kern- und Zusatzflächen in der Zeit vom April des Vorjahres bis einschließlich September des Wuchsjahres in zwei Untersuchungsperioden. In Klammern sind die Werte für die *response functions* angegeben.

Periode	1951-1983				1974-2006			
	Niederschlag		Temperatur		Niederschlag		Temperatur	
Parameter <i>R</i> (sig.)	+	-	+	-	+	-	+	-
KF 1+2	8 (6)	4 (2)	4 (2)	3 (1)	18 (5)	4 (2)	2 (1)	9 (1)
KF 3+4	7 (4)	1 (2)	3 (0)	1 (1)	9 (5)	3 (1)	2 (1)	10 (1)
ZF	5 (2)	2 (2)	1 (0)	4 (0)	8 (6)	4 (1)	4 (2)	2(0)

Die in Tab. 4-17 in Klammern aufgeführten Werte sind die Summen der signifikanten *response-function*-Koeffizienten über alle Flächen und alle Monate des Untersuchungszeitraums. Sie geben die Beziehungen zwischen Witterungswerten und Jahrringindizes wieder, die nach Entfernung aller Interkorrelationen zwischen Niederschlag und Temperatur in den einzelnen Monaten verbleiben, und sind deshalb meist deutlich niedriger beziehungsweise seltener signifikant als die PEARSON-Korrelationskoeffizienten. Für die Analyse der statistischen Beziehungen zwischen Witterung und Zuwachs ist es aber eher zweitrangig, den "bereinigten" Einfluss der einzelnen Monate zu kennen. Wenn zum Beispiel überdurchschnittliche Junitemperaturen signifikant mit zu geringen Niederschlägen in diesem Monat gekoppelt sind, dann ist bereits die in den Korrelationskoeffizienten gespeicherte "nicht bereinigte" Information wertvoll zur Abschätzung der Reaktionen der Bäume auf bestimmte Witterungskonstellationen. Deshalb hat sich dieser Abschnitt vor allem mit den Korrelations- und weniger mit den *response-function*-Koeffizienten beschäftigt.

4.3.4 Wirkungen tagesaufgelöster Witterungsparameter auf die Jahrringbreiten

Aus der großen Zahl von Einzelergebnissen, die sich mit CLIMTREG erarbeiten lassen, soll im Folgenden nur eine Auswahl beispielhaft dargestellt werden. Im Zentrum des Interesses stehen wie in den anderen Abschnitten schon flächenübergreifende Aussagen für den Gesamtzeitraum sowie Anhaltspunkte für mögliche Anpassungsreaktionen beziehungsweise generell für dynamische Veränderungen im Witterungs-Zuwachs-Komplex. Die unter diesen Aspekten bedeutsamen Ergebnisse werden beispielhaft für eine Einzelfläche und für

den herrschenden Bestand dargestellt. Anschließend erfolgt die zusammenfassende Betrachtung der Kernflächen sowie der Zusatzflächen.

Die erste Gruppe von Ergebnissen umfasst die Identifikation zuwachswirksamer Zeiträume für die Variablen Niederschlag und Temperatur auf den einzelnen Flächen. Abb. 4-79 stellt dazu beispielhaft die Perioden und ihre Korrelationskoeffizienten mit dem Jahrringindex dar, wie sie von CLIMTREG für die Sozialklasse 1+2 auf K1 berechnet wurden.

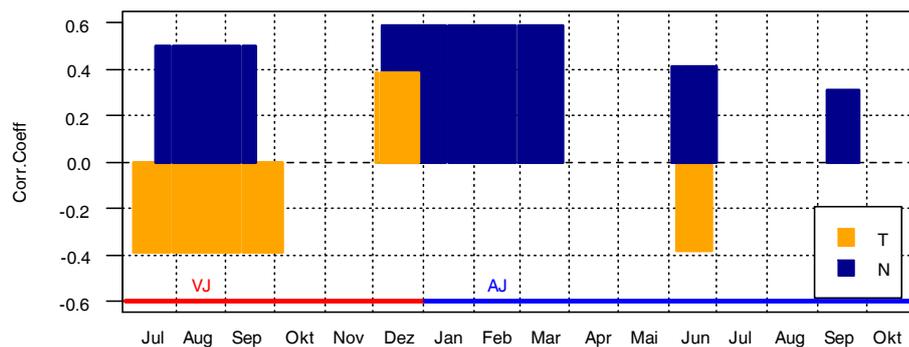


Abb. 4-79: Signifikant mit der Jahrringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres (VJ) bis 31.10. des aktuellen Jahres (AJ) von Temperatur (T) und Niederschlag (N) mit Angabe der entsprechenden Korrelationskoeffizienten (Corr.Coeff) nach Berechnung durch CLIMTREG für die Fläche K1, herrschender Bestand (Sozialklasse 1+2), Bezug: 1951-2006

Für die Sozialklasse 1+2 auf allen Kernflächen sowie für die ausgewählten Zusatzflächen erfolgten analoge Auswertungen wie in Abb. 4-79 dargestellt. Die Ergebnisse in Form der signifikant mit dem Jahrringindex korrelierten Zeiträume fasst nachstehende Abb. 4-80 zusammen. Die Höhe der farbigen Rechtecke zwischen den waagerechten Bezugslinien gibt den Wert der Korrelationskoeffizienten zwischen -1 und +1 wieder. Unterhalb der zentralen Abszisse befinden sich die negativen, oberhalb die positiven Koeffizienten, jede Fläche hat dabei ihre eigene Bezugs-"Null"-Linie. Die Korrelationen mit Niederschlagsvariablen sind in Blau, mit Temperaturvariablen in Gold dargestellt.

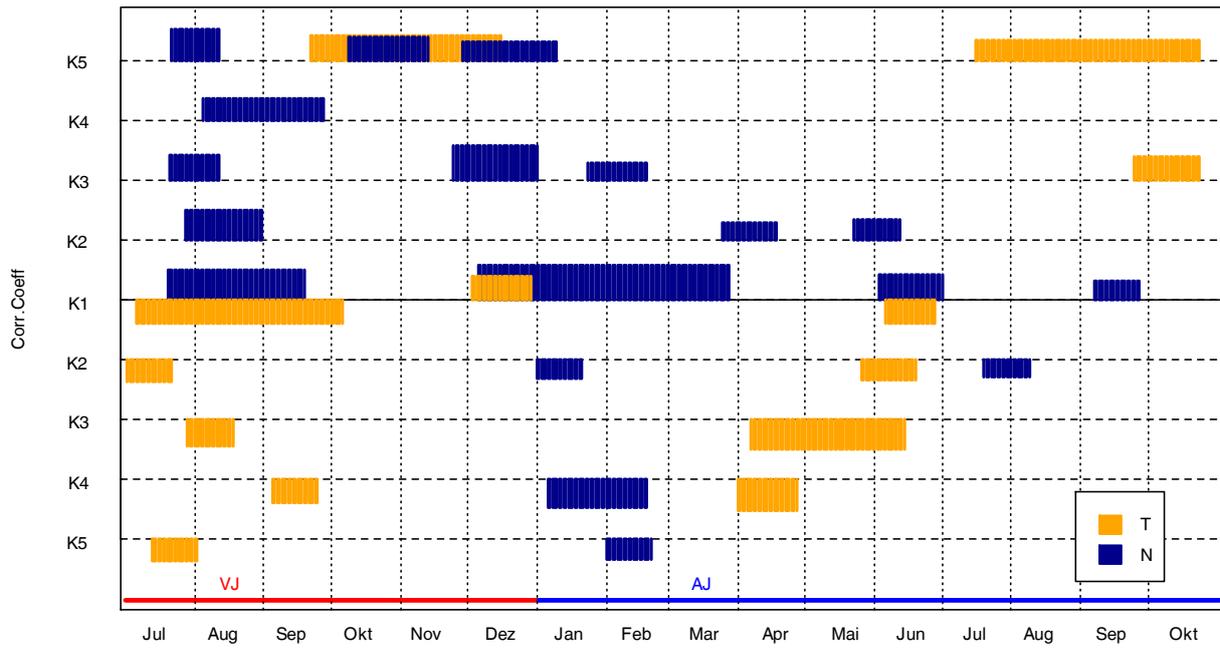


Abb. 4-80: Signifikant mit der Jahringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres (VJ) bis 31.10. des aktuellen Jahres (AJ) von Temperatur (T) und Niederschlag (N) mit Angabe der entsprechenden Korrelationskoeffizienten (Corr.Coeff) nach Berechnung durch CLIMTREG für die Kernflächen, herrschender Bestand (Sozialklassen 1+2), Bezug: 1951-2006.

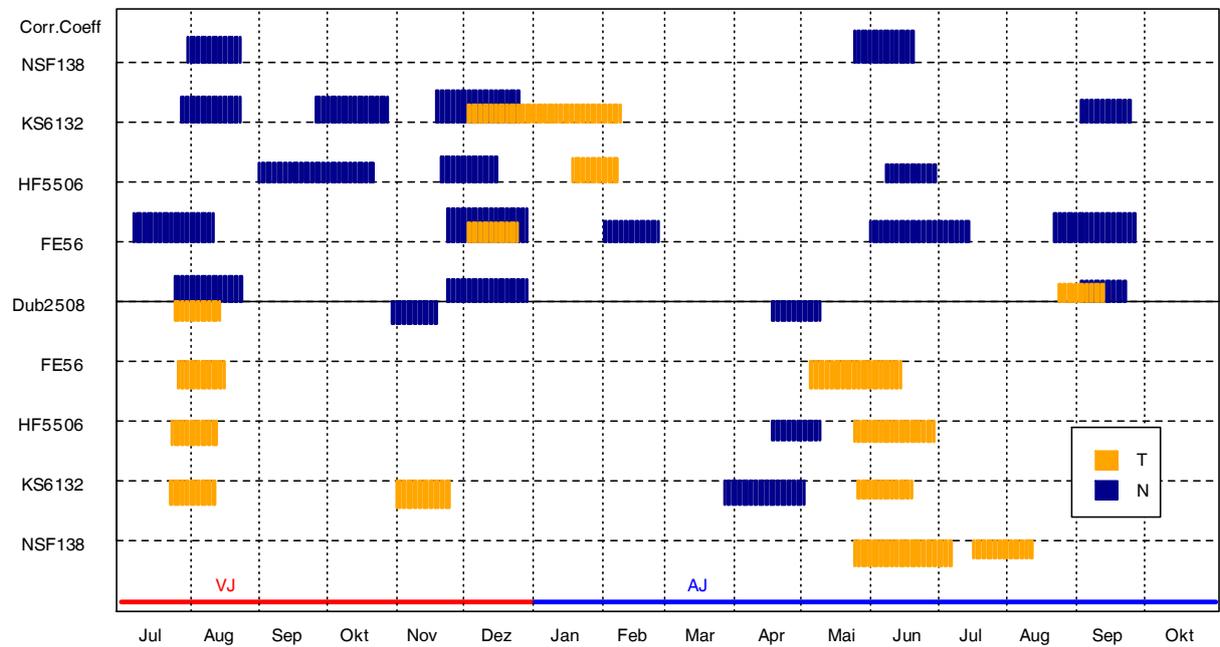


Abb. 4-81: Signifikant mit der Jahringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres (VJ) bis 31.10. des aktuellen Jahres (AJ) von Temperatur (T) und Niederschlag (N) mit Angabe der entsprechenden Korrelationskoeffizienten (Corr.Coeff) nach Berechnung durch CLIMTREG für ausgewählte Zusatzflächen, Bezug: 1951-2006.

Die Auswertung ergibt für die Kern- wie für die Zusatzflächen mehrere Schwerpunkte signifikanter Korrelationen innerhalb des Gesamt-Untersuchungsintervalls. Auffällig sind zum einen die Monate Juli und August (zum Teil auch September) des Vorjahres, in denen fast durchgängig hohe Niederschläge bei niedrigen Temperaturen mit überdurchschnittlichen Zuwachsraten verbunden sind. Der zweite wichtige Zeitraum erstreckt sich von Ende November bis in den Februar – hier fördern vor allem erhöhte Niederschlagsmengen die Jahrringbildung, in zweiter Linie auch Temperaturen oberhalb des langjährigen Mittels. Als drittes auffälliges Intervall zeigt sich die Zeit von Anfang April bis Mitte Juli mit höheren Zuwachsraten bei überdurchschnittlichen Niederschlägen und niedrigen Temperaturen.

Im Vergleich der Zusatzflächen ist das Bild einheitlicher als bei den Kernflächen, wo die größeren geografischen und klimatischen Differenzen zwischen den einzelnen Untersuchungsorten zu deutlicheren Abweichungen im Muster zuwachsrelevanter Perioden führen. Zwischen herrschendem und beherrschtem Bestand auf den Kernflächen sind die Unterschiede hingegen marginal. Fast identisch verhalten sich die beiden Sozialklassen auf K1 und K4, auf den anderen Flächen sind zwar einzelne Unterschiede in den identifizierten Zeiträumen zu sehen, diese sind jedoch nur gering (vergleiche Anhang 8.13).

Zwei Grundtendenzen sind aus den vergleichenden Darstellungen abzulesen. Als erstes fällt auf, dass Niederschläge so gut wie immer positiv mit den Jahrringindizes korreliert sind, nur im Januar/Februar im Falle von K4 und K5 sowie zum Teil K2 ist der Zusammenhang gegenläufig. Auf den Zusatzflächen treten vereinzelt von Ende März bis Anfang Mai (sowie in einem Fall im November) negative Korrelationen auf, der weit überwiegende Teil aller Beziehungen ist jedoch ebenfalls gleichläufig. Für die Temperaturen gelten diese statistischen Zusammenhänge quasi "spiegelverkehrt": Bis auf wenige Fälle sind unterdurchschnittliche Jahrringindizes mit ungewöhnlich niedrigen Temperaturen gekoppelt. Diese Ausnahmen betreffen die Wintermonate Dezember und Januar, für die am stärksten kontinental geprägte Fläche K5 erstreckt sich die positive Wirkung hoher Temperaturen von Ende September bis in den Januar und kommt zusätzlich ab Mitte Juli des Wuchsjahres zum Tragen.

Die beschriebenen Beziehungen gelten dann, wenn man den Gesamtzeitraum 1951-2006 zugrundelegt, für den tagesbezogene Witterungsdaten verfügbar sind. Um mögliche Verschiebungen in diesen Abhängigkeiten festzustellen, werden außerdem die erste und die zweite Hälfte des CIN zur Erstellung separater Modelle genutzt. Die graphischen Darstellungen für die Kern- und Zusatzflächen enthalten die Anhänge 8.14 und 8.15. Aus dem Vergleich untereinander sowie mit dem Modell für das CIN wird zum einen die zur Gegenwart hin zunehmende Bedeutung vor allem feuchter, aber auch kühler Sommer im Vorjahr sowie – in geringerem Maße – auch im Wuchsjahr für eine überdurchschnittliche Zuwachsraten deutlich. Zum anderen zeigen die in den verschiedenen Intervallen erzeugten Modelle auffällige Unterschiede hinsichtlich der Korrelationskoeffizienten (KK) zwischen den zuwachsrelevanten Perioden und dem Jahrringindex. Betrachtet man Niederschlag und Temperatur getrennt, dann ist sowohl für die Kern- als auch für die Zusatzflächen das ab-

solute Mittel der KK im Modell auf Basis der ersten Hälfte des CIN deutlich höher als für die zweite Hälfte¹. In der zweiten Hälfte des CIN sind die Zusammenhänge weniger gleichgerichtet: Das absolute Mittel der KK sinkt in beiden Flächenkollektiven deutlich für beide Witterungsparameter (siehe Abb. 4-82). Das *Mittel der absoluten KK* liegt jedoch auf dem gleichen Niveau wie in den beiden anderen Bezugsperioden. Dies deutet darauf hin, dass vor allem die im Vorzeichen der Korrelationskoeffizienten angezeigte *Richtung* der Zusammenhänge stärker wechselt als in der ersten Hälfte des CIN.

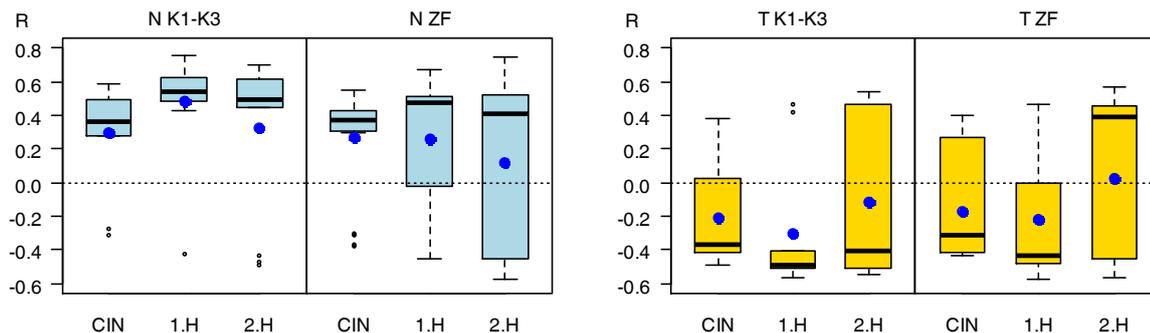


Abb. 4-82: Verteilung der mit CLIMTREG bestimmten Korrelationskoeffizienten (R) zwischen Jahrringindex und Zeiträumen des Niederschlags (N) beziehungsweise der Temperatur (T) im Mittel der deutschen Kernflächen (K1-K3) und der ausgewählten Zusatzflächen (ZF) bei Modellierung auf Grundlage des gesamten gemeinsamen Intervalls (CIN), der ersten Hälfte (1.H; 1951-1978) und der zweiten Hälfte (2.H; 1979-2006) des CIN. Als blaue Punkte sind zusätzlich die arithmetischen Mittel der Korrelationskoeffizienten angegeben.

Nach dem WILCOXON-Test ergeben sich zwischen den mittleren Korrelationskoeffizienten der einzelnen Modelle trotz der in Abb. 4-82 sichtbaren Unterschiede keine signifikanten Differenzen. Gleiches gilt für die nach CLIMTREG zuwachswirksamen Zeiträume. Diese verlängern sich zwar tendenziell gegen Ende des CIN, die vor allem in der zweiten Hälfte sehr große Streuung der Werte ist jedoch – wie im Fall der mittleren R -Werte – verantwortlich dafür, dass diese Unterschiede statistisch ohne Belang sind. Als auffälligste Verschiebung bleibt festzuhalten, dass in der jüngeren Vergangenheit vor allem auf den Zusatzflächen die zu Beginn des CIN hauptsächlich positiven Korrelationen zwischen Niederschlag und Zuwachsraten zum Teil in negative umschlagen. Zu den anfangs so gut wie ausschließlich negativen Korrelationen zwischen Temperatur und Zuwachsraten kommen außerdem in der zweiten Hälfte des CIN verstärkt positive hinzu (siehe auch Anhang 8.14 und 8.15).

Die signifikant mit der Zuwachsraten korrelierten Zeiträume (= Variablen; im Beispiel in Abb. 4-79 sieben) fasst CLIMTREG in einer Hauptkomponentenregression zusammen. Zuvor wird das Witterungsvariablen-Set einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen. Die Spannweite der Wirkung der Originalvariablen auf den Jahrringindex kann danach mit Hil-

¹ Wegen der großen geographischen Abstände zwischen den deutschen und den polnischen Kernflächen werden letztere aus der Berechnung der Mittelwerte auf dieser Auswertungsebene ausgeklammert.

fe von Boxplots geprüft werden. Diese Darstellungen sind dem Wesen nach eine Sensitivitätsanalyse des Modells (siehe 3.4.2, Seite 89). Sie sind zum einen möglich für den Zeitraum, mit dessen Hilfe das Modell kalibriert wurde. Je nachdem, welchen Ausschnitt (vom Gesamtzeitraum bis zu kürzeren Intervallen) man genutzt hat, ergeben sich unterschiedliche Sensitivitätsspannen. Zusätzlich wird analysiert, wie sich die durch verschiedene Kalibrierungsperioden entstandenen Modelle verhalten, wenn die Szenarien des PIK zur Entwicklung von Temperatur und Niederschlag in den nächsten Jahrzehnten zugrundegelegt werden. Auch für den in CLIMTREG (bisher) fixierten "Szenariozeitraum" von 2001 bis 2055¹ kann angegeben werden, welche Folgen für die prozentuale Abweichung des (modellierten) Jahrringindex² vom Wert 1 sich aus der Schwankung der einzelnen Parameter der Schätzfunktion ergeben. In Abb. 4-83 ist dies beispielhaft für die herrschenden Trauben-Eichen von K1 dargestellt.

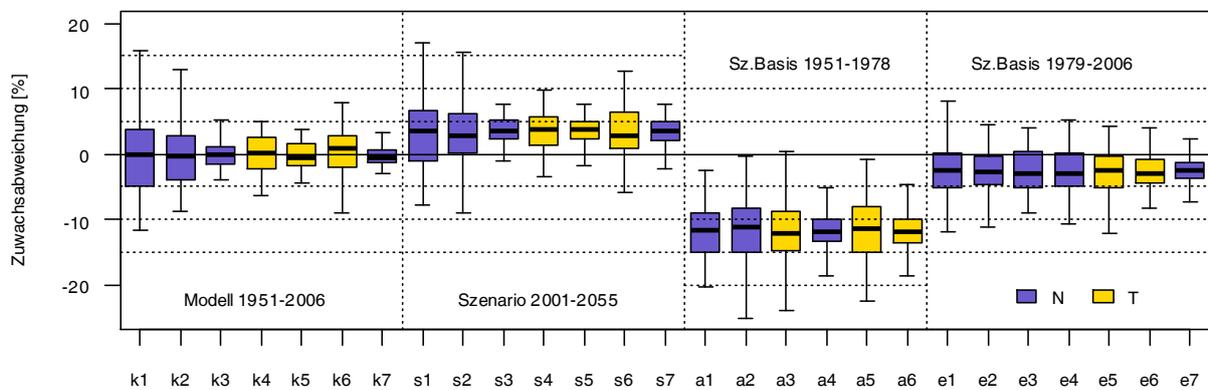


Abb. 4-83: Sensitivität der von CLIMTREG erzeugten Schätzmodelle für den Jahrringindex nach Hauptkomponentenregression bei unterschiedlichen Kalibrierungszeiträumen, Beispiel Sozialklasse 1+2, K1. Von links nach rechts: Prozentuale Zuwachsabweichung (PZ) im Kalibrierungszeitraum 1951-2006; PZ bei Projektion des Modells aus dem Kalibrierungszeitraum 1951-2006 auf den Szenariozeitraum 2001-2055; PZ bei Projektion des Modells aus dem Kalibrierungszeitraum 1951-1978 und bei Projektion des Modells aus 1979-2006. Auf der Abszisse sind die in den entsprechenden Modellen enthaltenen Parameter als Zeiträume des Niederschlags N und der Temperatur T dargestellt (auf die Angaben zu Lage und Länge dieser Zeiträume wird hier verzichtet).

Die Anwendung des unter Nutzung des gesamten möglichen Kalibrierungszeitraums erzeugten Modells auf den Szenariozeitraum bis 2055 führt im Fall von K1 zu einer leichten durchschnittlichen Erhöhung der Jahrringindexwerte. Nutzt man nur die erste Hälfte der Kalibrierungsperiode, entsteht ein Modell, das die Jahrringindizes unter Szenariobedingungen zurückgehen lässt. Die in der zweiten Hälfte dieser Periode herrschenden Beziehungen zwischen Witterung und Zuwachs hingegen erzeugen ein Modell mit nur minimal geringe-

¹ CLIMTREG (Version IV) ist für den Szenariozeitraum 2001-2055 programmiert, auch wenn inzwischen PIK-Szenarien bis 2060 verfügbar sind (3.4.1). Da in die Schätzung des aktuellen Jahrringindexes auch Perioden im Vorjahr eingehen, sind auf Basis von in 2001 beginnenden Witterungsdaten Jahrringindizes ab 2002 ableitbar.

² Der Jahrringindex als Zielgröße der Modellierung in CLIMTREG stellt in sich schon die "Zuwachsrate" dar. Deshalb lassen sich in diesem Abschnitt die Begriffe "Prozentuale Zuwachsabweichung", "Abweichung der Zuwachsrate" und "Prozentuale Abweichung des Jahrringindex" stellvertretend füreinander verwenden.

ren Indexwerten als bei Berücksichtigung der Gesamtperiode. In Bezug auf die wirksamsten Parameter bestätigt auch Abb. 4-83 die dominierende Bedeutung der Niederschläge im Vergleich zur Temperatur: Die blau eingefärbten Boxes weisen die höchsten potentiellen Schwankungen der Zuwachsrate (= "Zuwachsabweichung") auf.

Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse des Regressionsmodells bei Anwendung auf die Szenariodaten des PIK für die nächsten Jahrzehnte anhand der Entwicklung der modellierten Jahrringindizes betrachtet. Diese Extrapolation der gefundenen Modellbeziehungen impliziert deren fortbestehende Gültigkeit auch in der Zukunft – eine Annahme, deren Eintreten mit Unsicherheit behaftet ist, weil sich das Witterungs-Zuwachs-System in ständiger Bewegung befindet. Die tatsächliche zukünftige Entwicklung ist aber ebenso wenig bekannt. Die folgenden Auswertungen sind demzufolge – in Ermangelung exakten Wissens über die Zukunft – als Annäherungen, nicht als exakte Prognosen zu verstehen.

Je nach Kalibrierungszeitraum (vergleiche Abb. 4-83) ergeben sich für die Zeit ab 2002 unterschiedliche Modell-Jahrringindex-Zeitreihen. Abb. 4-84 stellt die Modellierungsergebnisse für die herrschenden Trauben-Eichen am Beispiel der Fläche K2 dar, wenn das gesamte gemeinsame Intervall 1951-2006 zur Kalibrierung genutzt wurde.

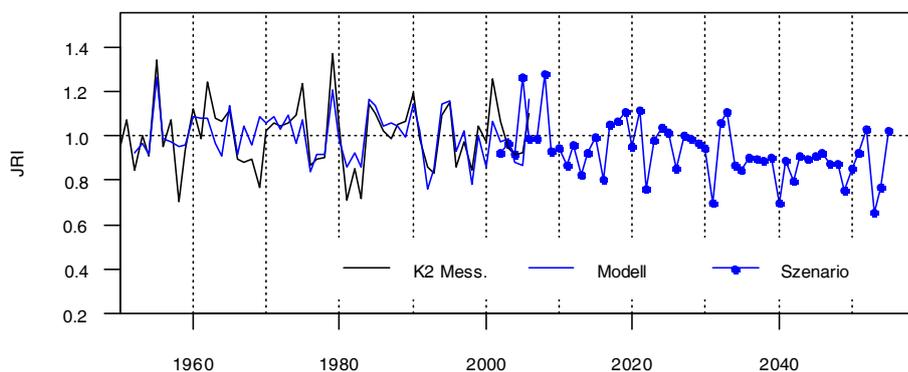


Abb. 4-84: Verlauf der Jahrringindexwerte (JRI) für den herrschenden Bestand auf K2 abgeleitet aus den gemessenen Jahrringbreiten (K2 Mess.) im Vergleich mit der Modellierung nach Hauptkomponenten-Regression (Modell). Zusätzlich dargestellt sind die mit dem Modell hergeleiteten Werte für das Szenario mit mittlerer Feuchte und zwei Kelvin Temperatursteigerung nach STAR 2 (Szenario).

Um zu prüfen, ob sich seit 1951 Veränderungen in den Reaktionen der Eichen auf die Witterung vollzogen haben, sollen wie bei der Sensitivitätsanalyse die Szenario-Zeitreihen bis 2055 bei unterschiedlichen Kalibrierungsperioden verglichen werden. Die Analyse richtet sich auf die 28-Jahres-Perioden am Beginn und am Ende des gemeinsamen Intervalls (1951-1978 beziehungsweise 1979-2006). Unterstützt wird die Gegenüberstellung durch die Angabe des linearen Ausgleichs der Jahrringindexwerte über der Zeit (Abb. 4-85).

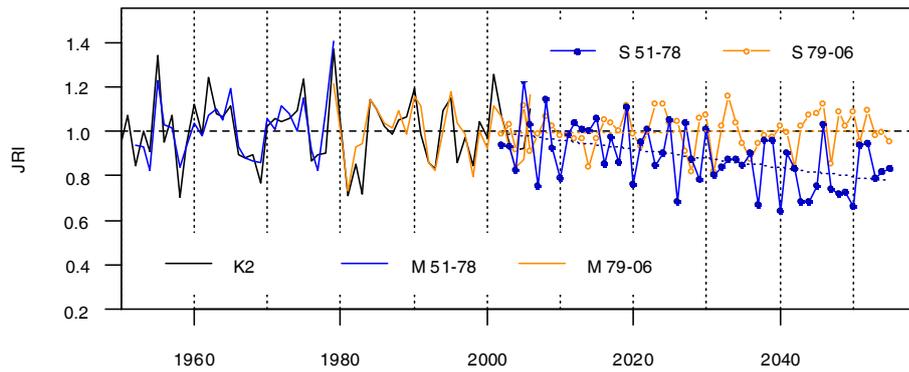


Abb. 4-85: Wirkung der Kalibrierung des Schätzmodells für den Jahrringindex (JRI) auf Basis von zwei verschiedenen Zeiträumen am Beispiel der herrschenden Trauben-Eichen auf K2. Gegenübergestellt sind die aus den Jahrring-Messwerten berechneten JRIs (K2), die Modellierung für die Zeiträume 1951-1978 (M 51-78) beziehungsweise 1979-2006 (M 79-06) sowie die aus den beiden Modellen abgeleiteten Entwicklungen des JRI unter Annahme des Klimaszenarios 2001-2055 (S). Für die Jahrringindizes im Szenariozeitraum sind als durchbrochene Linien zusätzlich deren lineare Modelle über der Zeit dargestellt.

Die in Abb. 4-85 gezeigten Jahrringindex-Zeitreihen als Folge verschiedener Modelle können in übersichtlicherer Art auch in kumulierter Form verglichen werden, das heißt als Zeitreihen der kumulierten Differenzen des Jahrringindex vom Referenzwert $JRI_m = 1$. Bestehen keine gerichteten Abweichungen der Zuwachsraten im betrachteten Zeitraum, dann wird die Kurve der kumulierten Differenzen nur zufällig um die Null-Linie schwanken. Für die deutschen Kernflächen¹ ergibt sich dabei folgendes Bild (Abb. 4-86):

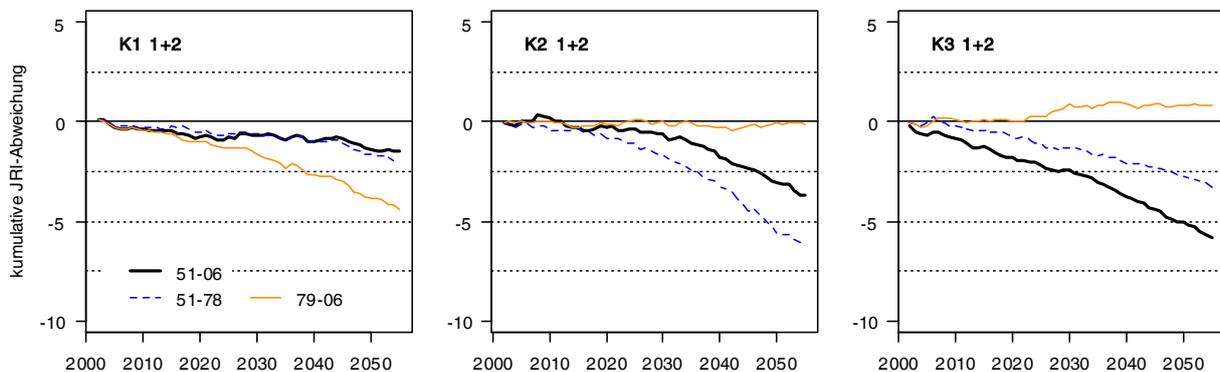


Abb. 4-86: Kumulative Abweichungen der in CLIMTREG auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume modellierten Jahrringindex-Zeitreihen vom Referenzwert 1 im Szenariozeitraum 2001-2055 für den herrschenden Bestand (Sozialklasse 1+2) der deutschen Kernflächen. Als Kalibrierungsperioden wurden das gesamte gemeinsame Intervall (CIN) benutzt (51-06) sowie die erste (51-78) und die zweite (79-06) Hälfte des CIN. In die Modellierung geht die Zeit ab Juli des Vorjahres ein, deshalb beginnen die Modell-JRI erst 2002.

¹ Analoge Darstellungen zum Verhalten der Modelle im Szenariozeitraum für den beherrschten Bestand und die Zusatzflächen enthält Anhang 8.16. Da für die polnischen Flächen keine Witterungs-Szenariodaten vorliegen, können sie in diesen Auswertungsschritt nicht einbezogen werden.

In Abb. 4-86 entstehen unterhalb der Null-Linie liegende Verläufe durch Jahrringindexwerte (JRI), für die überwiegend $JRI < 1$ gilt. In diesen Fällen sinken also die Zuwachsraten systematisch. Analog führen die Modelle, deren Kurven im Szenariozeitraum oberhalb der Null-Linie verlaufen, überwiegend zu Indexwerten mit $JRI > 1$. Das linke Diagramm für K1 ist demnach so zu interpretieren, dass die Kalibrierung des Witterungs-Zuwachs-Modells mit dem gesamten gemeinsamen Intervall (CIN) zu nur geringfügig sinkenden Zuwachsraten im Szenariozeitraum führt. Die kumulative Jahrringindex-Abweichung von etwa -1,5 über 54 Jahre bedeutet pro Jahr demnach eine mittlere Verringerung der Zuwachsrate von nur 2,8 %. Wendet man das mit den ersten 28 Jahren des CIN kalibrierte Modell auf die projizierte Klimaentwicklung an, dann verringert sich die jährliche Zuwachsrate nur unwesentlich stärker. Das Modell auf Basis der Jahre 1979-2006 hingegen führt zu einer deutlich größeren Abnahme der Zuwachsrate mit rund 7,9 %.

Für einen Vergleich der von den verschiedenen Modellen, das heißt auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume, erzeugten Zeitreihen bietet sich der t-Test auf Mittelwertgleichheit an. Damit soll festgestellt werden, ob mögliche Differenzen im mittleren Jahrringindex je nach Kalibrierungszeitraum statistisch signifikant oder zufälliger Natur sind. Die Normalverteilung der Jahrringindizes als Voraussetzung für die Anwendbarkeit des t-Tests wurde mit Hilfe des SHAPIRO-WILK-Tests geprüft, der hier vor allem wegen seiner Teststärke auch bei kleineren Stichproben zum Einsatz kommt¹. Es zeigte sich für keine der Kernflächen und für keinen der drei Kalibrierungszeiträume eine signifikante Abweichung der modellierten JRI von der Normalverteilung. Die Verteilung der Modell-Indizes im Szenariozeitraum am Beispiel des herrschenden Bestandes der deutschen Kernflächen stellt die folgende Abb. 4-87 dar (vergleiche auch Anhang 8.16).

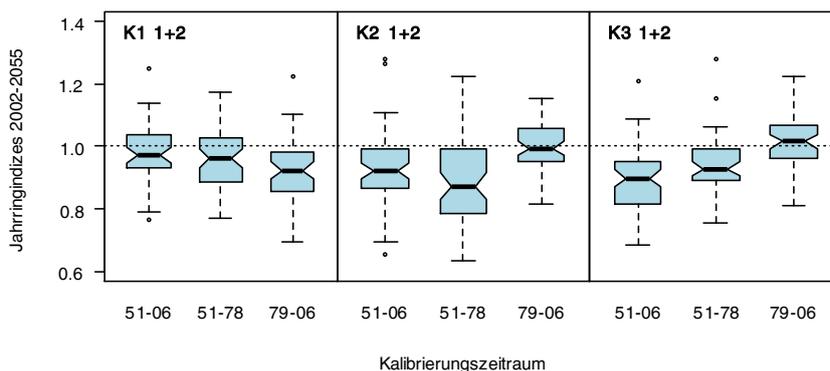


Abb. 4-87: Verteilung der Jahrringindizes (JRI) im Szenariozeitraum 2001-2055 nach Modellierung durch CLIMTREG auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume für die Kernflächen K1-K3, herrschender Bestand

Die zusammenfassende Betrachtung aller Flächen hinsichtlich der mit CLIMTREG identifizierten Veränderungen im Witterungs-Zuwachs-Komplex erfolgt in Tab. 4-18. Dort sind

¹ http://www.statistics4u.info/fundstat_germ/ee_shapiro_wilk_test.html (16.11.2012)

die mittleren Modell-JRI im Szenariozeitraum mit den Ergebnissen der t-Tests sowie die prozentualen Jahrringindex-Abweichungen dargestellt.

Tab. 4-18: Mittlere Werte (JRI_m) und mittlere prozentuale Abweichung vom Referenzwert = 1 (Abw_m) für die in CLIMTREG auf Basis der Kalibrierungszeiträume 1951-2006, 1951-1978 und 1979-2006 erstellten Modellzeitreihen des Jahrringindex für den Szenariozeitraum 2001-2055. Gleiche Exponenten zeigen Mittelwerte an, die sich nicht signifikant unterscheiden.

	K1 1+2			K2 1+2			K3 1+2			K1 3+4		
	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06
JRI_m	0,97 ^a	0,96 ^a	0,92	0,93	0,88	1,00	0,89	0,94	1,01	0,99	1,11	0,94
Abw_m [%]	-2,7	-3,7	-8,1	-6,9	-11,6	-0,2	-10,8	-6,0	1,5	-1,4	10,6	-6,0
	K2 3+4			K3 3+4			Dub2508			FE56		
	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06
JRI_m	0,91 ^b	0,92 ^b	0,98	0,98 ^c	0,93	0,99 ^c	1,04	0,98	1,08	0,96 ^d	0,94 ^d	0,94 ^d
Abw_m [%]	-9,5	-8,3	-1,7	-2,5	-6,7	-0,7	4,3	-1,5	7,6	-3,8	-6,0	-6,2
	HF5506			KS6132			NSF138					
	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06	51-06	51-78	79-06			
JRI_m	0,95 ^e	0,95 ^e	1,12	0,88 ^f	0,88 ^f	1,01	0,95 ^g	0,95 ^g	0,98 ^g			
Abw_m [%]	-4,7	-5,4	11,8	-11,7	-11,7	1,1	-5,4	-5,4	-1,7			

Auf den Zusatzflächen wies der SHAPIRO-WILK-Test für einige der modellierten Jahrringindex-Zeitreihen auf signifikante Abweichungen vom Normalverteilungsmuster hin. Dort wurde statt des t-Tests der WILCOXON-Test zur paarweisen Prüfung auf Mittelwertgleichheit angewendet (WEISSTEIN 2011)¹, die Ergebnisse sind ebenfalls in Tab. 4-18 enthalten. Die Auswertung zeigt, dass bis auf zwei (K1 und FE56) der acht hierfür untersuchten Flächen alle Bestände einen höheren mittleren Jahrringindex im Szenariozeitraum zeigen, wenn man die 28-Jahres-Periode am Ende des von Witterungs- wie von Zuwachsdaten gemeinsam abgedeckten Intervalls (CIN) zur Modellkalibrierung nutzt. Das statistische Modell, das auf Basis der in der zweiten Hälfte des CIN herrschenden Witterungs-Zuwachs-Beziehungen erstellt wurde, führt demnach meist zu durchschnittlich höheren Zuwachsraten als das Modell auf Basis der ersten Hälfte des CIN.

4.4 Ergebnisüberblick

Die bis hierher dargestellten Teilbereiche der Untersuchungen haben eine Fülle von Ergebnissen erbracht. Bevor der nächste Abschnitt die wichtigsten Ausschnitte diskutiert, sollen sie im Folgenden mit Blick auf die Ausgangsfragen noch einmal zusammengefasst werden.

¹ WEISSTEIN, E. W.: Spearman Rank Correlation Coefficient / Wilcoxon Rank Sum Test. From "MathWorld – A Wolfram Web Resource", <http://mathworld.wolfram.com/SpearmanRankCorrelationCoefficient.html> beziehungsweise <http://mathworld.wolfram.com/WilcoxonRankSumTest.html> (16.08.2011)

(1) Kronenzustand

Im Untersuchungszeitraum 2006-2011 haben sich der Belaubungsgrad und die Kronenstruktur für die Mehrzahl der untersuchten Bäume auf den Kernflächen deutlich verbessert. Es ist anzunehmen, dass die zu Beginn schlechteren Werte beider Parameter zumindest auf den deutschen Flächen K1, K2 und K3 als Spätfolgen des Extremsommers 2003 sowie des trockenen, warmen Frühjahrs und Frühsommers 2006 zu interpretieren sind. Langfristige, das heißt mehrere Jahre übergreifende Einflüsse auf den Kronenzustand spiegeln sich eher in der Kronenstruktur, kurzfristige Einflüsse auf Jahresebene schlagen sich im Laubverlust nieder. Beide Parameter sind nicht stellvertretend füreinander zu verstehen, sondern ergänzen sich in ihrem Informationsgehalt. Die besten Kronenzustands-Werte waren zu Beobachtungsbeginn auf K2, die schlechtesten auf K1 sowie auf den polnischen Flächen K4 und K5 festzustellen. In den folgenden drei Jahren verringerte sich vor allem der Laubverlust der Eichen auf K3 (von rund 29 auf knapp 15 %) sowie auf K5 (von etwa 40 auf gut 19 %). Am Ende der Untersuchungen im Frühjahr 2011 war die Kronenstruktur am besten auf K2 (4,74) und auf K3 (5,36, beides nach dem achtstufigen Schlüssel nach KÖRVER et al. 1999). K1 erwies sich als die deutsche Fläche mit den schlechtesten Werten beider Kronenzustandsparameter, beide polnischen Flächen schnitten jedoch noch deutlich schlechter ab.

Mit dem relativen Kreisflächenzuwachs ist die Kronenstruktur ($R = -0,162$, hochsignifikant) über alle Kernflächen hinweg straffer korreliert als der Laubverlust ($R = -0,023$, nicht signifikant). Zwischen beiden Parametern bestehen überall hochsignifikante Rangkorrelationen, die im Mittel bei $R = 0,48$ liegen. Auch die relative (waagerechte) Kronenfläche steht in einem statistisch bedeutsamen Zusammenhang mit den Vitalitätsparametern: Bei gleichem BHD sind größere Kronenflächen sowohl mit besseren, das heißt niedrigeren, Kronenstrukturwerten als auch mit niedrigerem prozentualen Laubverlust gekoppelt.

(2) Radialzuwachs und Durchmesserentwicklung

Auf den meisten Kernflächen nimmt der jährliche Radialzuwachs seit mehreren Jahrzehnten stetig zu, die Durchmesserentwicklung über der Zeit zeigt dementsprechend in der Regel einen konvexen bis linearen Verlauf. Eine Ausnahme bildet die Fläche K5 mit vergleichsweise sehr hohem Wachstum in der Jugend, das danach auf eine gleichmäßige Oszillation um einen statischen Mittelwert abgefallen ist. Im Mittel der Kernflächen liegen die Radialzuwächse mit Rinde des herrschenden Bestandes in den letzten zehn Jahren bei einem Wert von etwas über zwei Millimeter pro Jahr und damit leicht über dem Zuwachs des Grundflächenmittelstamms in der ersten Ertragsklasse nach ERTELD (1963). Auf den Zusatzflächen ist dieser ansteigende Zuwachstrend nicht zu beobachten. Die mittlere Jahringbreite liegt hier ungefähr auf Ertragstafelniveau, die Durchmesserkurven sind meist linear bis leicht konkav. Zu beachten ist dabei allerdings, dass das Alter der einzelnen Bestände innerhalb der Zusatzflächen deutlich stärker variiert als das Alter der Kernflächen. Gleiches gilt – da es sich so gut wie überall um Mischbestände handelt – für das Altersverhältnis zur Kiefern-Beimischung.

Die Korrelationen zwischen Radialzuwachs und Ausgangsradius waren auf den Kernflächen deutlich niedriger als zwischen Kreisflächenzuwachs und Ausgangskreisfläche. Im Zeitraum 2002-2006, der für die beprobten Bäume auf Grundlage der Bohrkernanalysen untersucht wurde, bestand nur bei Zusammenfassung aller Flächen ein statistisch signifikanter linearer Zusammenhang zwischen Radialzuwachs und Ausgangsradius. In der Periode 2006-2010 sind die Korrelationen straffer und meist hochsignifikant, auch bedingt durch den höheren Stichprobenumfang, der aus der Wiederholungs-Vollklappung resultierte. Die absolut und relativ höchsten Zuwächse in Radius und Kreisfläche in dieser Zeit zeigen die polnischen Flächen K4 und K5, die auch die Ertragstafelwerte übertreffen. In Deutschland ist die K2 am wuchskräftigsten gewesen – auch dort liegt der Zuwachs des Grundflächenmittelbaums über den Tafelwerten, während K3 (relativ) sowie K1 (relativ und absolut) etwas darunter bleiben.

(3) Eigenschaften der Jahrringbreiten- und Jahrringindex-Zeitreihen

Über den gesamten gemeinsamen Untersuchungszeitraum seit 1900 gesehen, belegt die Datenauswertung für alle Kernflächen signifikante Autokorrelationen ersten Grades (AK1) zwischen der Jahrringbreite des Wuchsjahres und der des vergangenen Jahres. Sie sind am stärksten mit Koeffizienten (R) zwischen 0,8 und 0,9 für K2 und K5, am schwächsten bei $R \sim 0,55$ für K4. Korrelationen mit noch weiter zurückliegenden Jahren sind auf K2 und K5 am stärksten, auf K3 und K1 am schwächsten ausgeprägt. Herrschender und beherrschter Bestand unterscheiden sich auf den einzelnen Flächen jeweils nicht voneinander, wenn die AK1 mit Bezug auf die Periode 1900-2006 berechnet wird. Ausnahme ist K3, wo die Sozialklasse 1+2 signifikant geringere Korrelationskoeffizienten zeigt als die Sozialklasse 3+4. Dieses Verhältnis (geringere AK1 in der Sozialklasse 1+2 als in der Sozialklasse 3+4) stellt sich auch auf den anderen Flächen dann ein, wenn nur noch die Periode 1951-2006 zur Berechnung der AK1 herangezogen wird. Nur auf K1 weisen beide Sozialklassen in diesem Zeitraum gleiche AK1-Niveaus auf. Die Bildung gleitender Mittel über 21 Jahre belegt Minima im Verlauf der mittleren AK1 zwischen 1900 und 1910 sowie zwischen 1980 und 1990. Die Unterschiede in der mittleren AK1 sind zwischen den einzelnen Zusatzflächen wegen der größeren Alters- und Mischungsdiversität größer als zwischen den Kernflächen. Die dort auffälligen Minima treten jedoch auch im Verlauf der mittleren AK1 auf den Zusatzflächen auf. Signifikante zeitliche Trends mit Bezug auf den Gesamtzeitraum sind weder auf den Kern- noch auf den Zusatzflächen zu belegen.

Hinsichtlich der Sensitivität in den Zeitreihen der mittleren Jahrringbreite zeigen die Kernflächen geringe Unterschiede. Der Wert für die einheitliche Untersuchungsperiode seit 1900 liegt auf K1 am höchsten und auf K2 am niedrigsten. Statistisch vergleichbar sind K1 und K4 einerseits sowie K2, K3 und K5 andererseits. Zwischen den Sensitivitäten der beiden Sozialklassen gibt es keine statistisch signifikanten Differenzen. Im Vergleich der ersten und der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts haben sich die mittleren Sensitivitäten nur auf K5 signifikant verringert, auf den anderen Flächen bestehen keine Unterschiede zwi-

schen den verschiedenen Wachstumsperioden, obwohl die Werte tendenziell für die Zeit ab 1951 etwas niedriger liegen. In der zeitlichen Entwicklung haben die Eichen auf K1 durchgängig am empfindlichsten auf äußere Einflüsse reagiert und zeigen wie die auf K4 nach stetig fallenden Werten bis etwa 1950 seitdem wieder einen auffallend ansteigenden Trend. K3 weist nach wechselhafter erster Hälfte einen deutlich fallenden Trend in der mittleren Sensitivität auf, K2 und K5 verhalten sich stationär, das heißt ohne zeitliche Trends. Hinsichtlich ihrer mittleren Sensitivität über den gesamten Untersuchungszeitraum unterscheiden sich die Kernflächen ($S_{am} = 17,9\%$) nicht von den Zusatzflächen ($S_{am} = 18,5\%$), in der Entwicklung beider mittlerer Reihen ist kein zeitlicher Trend zu erkennen. Vergleicht man die flächenspezifischen Mittelwerte von AK1 und Sensitivität für die Zeit bis 1980 mit denen von 1980-2006, so zeigen sich zwar tendenzielle Verschiebungen in Richtung geringerer Autokorrelation, die jedoch weder im Mittel der Kernflächen noch im Mittel der Zusatzflächen statistisch signifikant sind.

Die Zeitreihen des mittleren Jahrringindex verlaufen für die beiden Sozialklassen auf den Kernflächen jeweils sehr synchron. Der höchste Korrelationskoeffizient zwischen den Chronologien des herrschenden und des beherrschten Bestandes berechnet sich für K1 (0,96), der niedrigste für K2 (0,85). Die engste Interkorrelation zwischen den Flächen zeigen K1 und K3 (0,52), die geringste besteht zwischen den am weitesten voneinander entfernten K1 und K5 (0,13).

Je nach Fläche treten unterschiedliche temporale Veränderungen der mittleren Gleichläufigkeit (GLK) zwischen den baumindividuellen Jahrringindex-Zeitreihen auf: Während sie auf K2 von der ersten zur zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts steigt, sinkt sie auf K5 deutlich ab. Im mittleren GLK-Niveau sind einerseits K2 und K5 (bei knapp 50 %), andererseits K1, K3 und K4 (bei etwa 60 %) miteinander vergleichbar. Die zweite Gruppe zeigt keinen Trend zur Veränderung der mittleren GLK zwischen den Perioden bis 1950 und seit 1951. Auf den Zusatzflächen liegt die mittlere Gleichläufigkeit innerhalb der Stichproben zwischen 38 und 66 % mit einem Mittelwert von 57 %. Die Eichenpopulationen mit einem Alter unter 60 Jahren sind etwas schwächer miteinander korreliert als die von über sechzigjährigen Beständen ($R = 0,44$ vs. $R = 0,54$), ein Alterstrend hinsichtlich der Korrelation lässt sich jedoch nicht nachweisen. Über alle Flächen hinweg liegt der mittlere Korrelationskoeffizient zwischen den Einzelkurven bei 0,47. Das Niveau der GLK im Untersuchungszeitraum hat sich trotz deutlicher Schwankungen in einzelnen Jahrzehnten ebenso wie im Fall der Kernflächen nicht wesentlich verändert.

(4) Weiserjahanalyse

Die höchste Zahl von insgesamt auffälligen Jahren im Zeitraum 1900-2006 zeigt der herrschende Bestand auf der Fläche K1 mit 24 positiven (davon neun extremen) sowie 31 negativen (davon 17 extremen) Weiserjahren (WJ). Durchgängig ist die Zahl der einfachen WJ sowohl im positiven wie auch im negativen Sinne in der Sozialklasse "1+2" höher als in der Sozialklasse "3+4". Allgemein gibt es mehr negative als positive WJ, die absolut wenigsten

weist die Fläche K5 auf. Über den Gesamt-Untersuchungszeitraum betrachtet zeigen sich keine auffälligen Veränderungen in der Häufigkeit der WJ, weder für die Kern- noch für die Zusatzflächen. Hinsichtlich der zeitlichen Lage der WJ unterscheiden sich herrschender und beherrschter Bestand auf keiner Fläche. In der Gesamtschau ist die Ähnlichkeit für die negativen Weiserjahre am geringsten zwischen K1 und K5, am höchsten zwischen K1 und K3. Die positiven Weiserjahre sind am ähnlichsten verteilt auf K2 und K5, am größten ist der Unterschied zwischen K1 und K4. Die Ähnlichkeitsanalyse auf den Zusatzflächen zeigt, dass der Grad der Übereinstimmung nicht ausschließlich von der geographischen Nähe, sondern auch vom Alter beziehungsweise vergleichbaren Entwicklungsphasen abhängt. Besonders markant sind die Jahre 1970, 1992 und 1954 als negative sowie 1975 und 1955 als positive WJ. Wie auf den Kern- sind auch auf den Zusatzflächen mehr negative als positive WJ aufgetreten.

Hinsichtlich des Einflusses jahresbezogener Witterungsdaten auf das Zuwachsverhalten sind allgemein die Korrelationen der Jahrringindizes (JRI) mit dem Niederschlag etwas straffer als die mit der Temperatur. Insgesamt jedoch sind die Beziehungen statistisch nur selten signifikant. Die höchsten Korrelationskoeffizienten ergeben sich für herrschenden wie beherrschten Bestand auf K1 sowie – knapp unter der Signifikanzschwelle – auf K3 mit der jährlichen Niederschlagsdifferenz zum dreißigjährigen gleitenden Mittel (Bilanz). Der jahresbezogene Trockenheitsindex nach DE MARTONNE (1926) ist in ähnlicher Weise wie die Niederschlagsbilanzen mit dem JRI gekoppelt. Für die Jahresmitteltemperaturdifferenzen bestehen in keinem Fall statistisch signifikante Beziehungen zur JRI-Zeitreihe, gleiches gilt für den Kontinentalitätsindex nach GORCZYNSKI (1920). Von den untersuchten Zusatzflächen wies nur eine (FE118) signifikante Korrelationen zur Niederschlagsbilanz und zum Trockenheitsindex auf, alle anderen Beziehungen sind statistisch rein zufällig. Die nur für die Vegetationsperiode berechneten Indizes und Bilanzen wiesen in keinem Fall höhere Korrelationskoeffizienten auf als die für das Gesamtjahr ermittelten Werte.

(5) Einfluss monatlich aufgelöster Witterungsparameter auf die Zuwachsrates

Zur Prüfung der Zusammenhänge auf Monatsebene kam das Programmpaket `bootRes` mit den bereits bei den jahresbezogenen Analysen verwendeten Witterungsdaten für die Kernflächen sowie für fünf Zusatzflächen zur Anwendung, die wegen der Länge ihrer Zeitreihen und ihrer repräsentativen Lage ausgewählt wurden. Die Untersuchungen konzentrierten sich zum einen auf das von Zuwachs- wie von Witterungsinformationen gleichermaßen abgedeckte Zeitintervall (CIN) als Ganzes, zum anderen wurden die erste und die zweite Hälfte des CIN getrennt analysiert. Im Mittelpunkt standen die Korrelationsbeziehungen zwischen Witterungs-Monatswerten und den Jahrringindizes.

In Auswertung der `bootRes`-Ergebnisse für das CIN fallen charakteristische Ähnlichkeitsmuster in der Sequenz der Kernflächen von West nach Ost auf. So zeigen die Flächen K1 und K3 zum Beispiel ein ähnliches Bild bezüglich der Wirkung einzelner Monate: Höhere Jahrringindizes sind mit überdurchschnittlichen Niederschlägen vor allem in den Winter-

monaten sowie im Spätsommer bis Frühherbst des Wuchsjahres gekoppelt. Auf den übrigen Kernflächen sind die Zusammenhänge im Vergleich weniger straff. Signifikant negative Korrelation der Niederschläge im Januar zum Jahrringindex sind K2 und K4 gemeinsam, K5 zeigt meist positive – wenn auch schwächere – Wirkungen höherer Niederschläge im Spätherbst und Winter des Vorjahres. Im Gegensatz zu K1 und K3 sind unterdurchschnittliche Niederschläge im Spätsommer des Wuchsjahres förderlich für den Jahrringindex. Die beiden Sozialklassen zeigen kaum Unterschiede in der Reaktion des Jahrringindex auf die monatsbezogenen Witterungsparameter.

Die Beziehungen zu den Mitteltemperaturen sind generell zwar etwas schwächer ausgeprägt, ergeben aber die gleiche Rangfolge in der Zuwachsrelevanz der Witterung. Danach sind auf allen Flächen vor allem kühle Spätfrühlings- und Frühsommermonate mit überdurchschnittlichen Jahrringindizes verbunden, mit geringerer Signifikanz auch milde Dezember. Am deutlichsten zeigt sich der Einfluss der Temperatur auf den Jahrringindex auf K1 und K3, etwas weniger klar auf K4 und K5, während K2 keine signifikanten Beziehungen aufweist. Die im mittleren Teil Brandenburgs gelegenen Zusatzflächen sind sich ähnlich in Richtung und Stärke der festgestellten Korrelationen, die südöstliche Fläche zeigt davon etwas abweichende Reaktionsmuster ebenso wie die südwestliche mit den am wenigsten straffen Zusammenhängen. Insgesamt bestätigen sich – je nach Lage – für die Zusatzflächen die für die deutschen Kernflächen gefundenen Beziehungen. Die komplementäre Wirkung von Temperatur und Niederschlag lässt sich bei paralleler Betrachtung gut erkennen: Während fast alle signifikanten Korrelationskoeffizienten für die Mitteltemperaturen negativ sind und in Frühjahrs- und Sommermonaten auftreten, ist ihr Vorzeichen im Fall der Niederschlagssummen bis auf wenige Ausnahmen positiv.

Die getrennte Analyse der ersten und der zweiten Hälfte des CIN durch *moving windows* zeigt vor allem für K1 und K4 im Lauf der Zeit deutlich zunehmende signifikante Korrelationen zwischen Witterung und Jahrringindex. Auch für K2 ergeben sich 1974-2006 vier positive Beziehungen zum Niederschlag im Vergleich zu vorher nur einer positiven und einer negativen. Die anderen Flächen zeigen keine auffälligen Veränderungen in Häufigkeit und Richtung signifikanter Korrelationen. In Zusammenfassung aller Flächen ergeben sich für die zweite Untersuchungsperiode deutlich mehr statistisch bedeutsame Zusammenhänge als in der ersten, außerdem steigt der Anteil positiver Korrelationen mit dem Niederschlag und negativer Korrelationen mit der Temperatur. In ähnlicher Form gilt dies auch für den beherrschten Bestand und die ausgewählten Zusatzflächen. Die *response-function*-Werte sind seltener signifikant und meist geringer als die Korrelationskoeffizienten.

(6) Einfluss tagesskalierter Witterungsparameter auf die Zuwachsrate

Die Auswertung der tagesgenauen Beziehungen zwischen Witterung und Jahrringindex mit dem Programmpaket CLIMTREG für das CIN ergibt für Kern- wie für Zusatzflächen mehrere Schwerpunkte signifikanter Korrelationen. Auffällig ist zum einen der Hochsommer des Vorjahres, für den fast durchgängig hohe Niederschläge bei niedrigen Temperaturen zu

überdurchschnittlichen Zuwachsraten führen. Im zweiten wichtigen Zeitraum von Ende November bis in den Februar fördern vor allem erhöhte Niederschlagsmengen die Jahrringbildung in der folgenden Vegetationsperiode, zum Teil auch Temperaturen oberhalb des langjährigen Mittels. Das dritte auffällige Intervall ist die Zeit von Anfang April bis Mitte Juli mit höheren Zuwachsraten bei niedrigen Temperaturen und überdurchschnittlichen Niederschlägen. Bei den Zusatzflächen ist das Bild einheitlicher als bei den Kernflächen, wo die größeren geografischen und klimatischen Differenzen deutlichere Abweichungen im Muster zuwachsrelevanter Perioden nach sich ziehen. Die Unterschiede zwischen herrschendem und beherrschtem Bestand auf den Kernflächen sind hingegen nur gering.

Zur Klärung der Frage, ob sich mit Hilfe von CLIMTREG Verschiebungen in den Witterungs-Zuwachs-Beziehungen über den Verlauf des CIN nachweisen lassen, diente die Modellierung von Jahrringindex-Zeitreihen für den Szenariozeitraum 2001-2055. Die Modelle leiten sich aus den Korrelationen von Niederschlag und Temperatur mit dem Jahrringindex in frei wählbaren Kalibrierungsperioden ab. In das auf deren Basis hergeleitete multiple Regressionsmodell werden tagesaufgelöste Szenario-Witterungsdaten eingesteuert. Als Vergleichsgrößen dienen der mittlere JRI sowie der Verlauf der kumulativen Abweichung des JRI vom Referenzwert 1 im Szenariozeitraum. Als Kalibrierungsperioden werden das gesamte CIN, dessen erste und dessen zweite Hälfte gegenübergestellt. Die Analysen umfassen wegen fehlender Szenariodaten für Polen nur die deutschen Kern- sowie die Zusatzflächen.

In den meisten Fällen schätzt das mit der zweiten Hälfte des CIN parametrisierte Modell die höchsten mittleren JRI, Ausnahmen sind K1 und FE56. Auch die kumulativen Abweichungen der modellierten JRI sind bis auf die genannten Ausnahmen am wenigsten negativ, wenn man diese Periode zur Kalibrierung nutzt. Die von CLIMTREG identifizierten Zeiträume mit statistisch signifikanter Korrelation zwischen Witterung und JRI verändern im Vergleich der unterschiedlichen Kalibrierungszeiträume in der Regel weder ihre Lage noch ihre Länge in wesentlichem Ausmaß. Auffällig ist jedoch, dass sowohl bei den Kern- als auch bei den Zusatzflächen die Richtung der Zusammenhänge in der zweiten Hälfte des CIN uneinheitlicher wird. Neben die anfangs fast durchgängig negativen Wirkungen höherer Temperaturen und geringer Niederschläge auf die Zuwachsraten treten später auch positive Effekte dieser Merkmalsausprägungen.

5 Diskussion

Das folgende Kapitel orientiert sich an der Grundstruktur des formulierten Zielsystems. Zu Beginn werden der Klimawandel auf regionaler Ebene als wesentliche Rahmenbedingung der Waldentwicklung heute und in Zukunft sowie die genutzte Datengrundlage erörtert, im Hauptteil die angewandten Methoden und erzielten Ergebnisse entsprechend der formulierten Hauptziele dieser Arbeit diskutiert. Besonderes Gewicht wird auf die im Abschnitt 2.5 festgehaltenen Kernfragen gelegt. Abschließend erfolgen eine zusammenfassende Betrachtung der Chancen und Risiken für die Trauben-Eiche im Untersuchungsgebiet sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsschwerpunkte. Auf Grund der Vielfalt der erarbeiteten Ergebnisse geht es in der Diskussion vor allem darum, die wesentlichen Punkte noch einmal hervorzuheben und möglichst tiefgehend zu behandeln.

5.1 Datengrundlage und Methoden

5.1.1 Klimawandel im Untersuchungsgebiet

Im Folgenden soll stichpunktartig diskutiert werden, ob die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen gerichteten Veränderungen der Witterungsverhältnisse auch für das Untersuchungsgebiet im engeren Sinne, das heißt an den Klimastationen nahe der Kernflächen sowie im Bereich der Referenzstationen, feststellbar sind. Auf Grund der hohen interannuellen Variabilität der Witterung im betrachteten Gebiet sind diese Veränderungen nur über einen längeren Zeitraum nachzuweisen. Die zur Verfügung stehenden Daten ermöglichen die detaillierte Betrachtung der Periode 1951-2006 (beziehungsweise 1958-2006 für die polnischen Flächen). In diesem Zeitraum wurden die Mitteltemperaturen und Niederschlagssummen für die einzelnen Jahre sowie für deren meteorologische Jahreszeiten Frühling (01.03.-31.05.), Sommer (01.06.-31.08.), Herbst (01.09.-30.11.) und Winter (01.12.-28.02.) berechnet. Lineare Modelle der Jahres- und Quartalswerte über der Zeit ermöglichen daraufhin die statistische Einordnung der Veränderungen beider Witterungsparameter in den vergangenen 60 Jahren (Abb. 5-88).

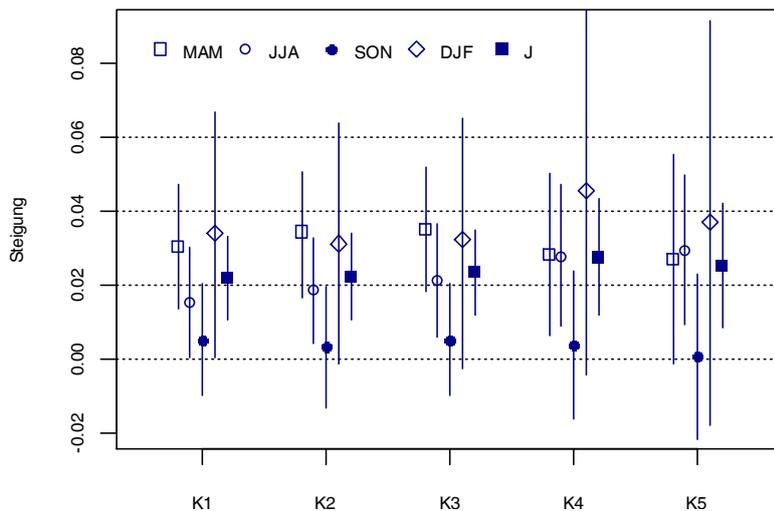


Abb. 5-88: Veränderung der Mitteltemperaturen nach Jahreszeiten in den Messreihen für die Kernflächen. Dargestellt ist die Steigung der Ausgleichsgeraden für die Frühlings- (MAM), Sommer- (JJA), Herbst- (SON), Winter- (DJF) und Jahresdurchschnittswerte (J) von 1951-2006 (K4 und K5: 1958-2006). Die senkrechten Linien geben die 95%-Konfidenzintervalle an.

Die getrennte Betrachtung der meteorologischen Jahreszeiten belegt die stärkste Zunahme der Mitteltemperaturen in den Frühlingsmonaten, die sich seit 1951 von West nach Ost in ungefähr gleicher Größenordnung (etwa 0,03 °C pro Jahr) vollzogen hat. Der Anstieg der Wintertemperaturen war meist mindestens ebenso stark, relativiert sich aber durch die im Vergleich zu allen anderen Jahreszeiten viel höheren Konfidenzintervalle (KI), die stärkere interannuelle Schwankungen anzeigen. So sind bis auf K1 die Winteranstiege auch nirgendwo statistisch signifikant; in der Abb. 5-88 ist das an den unter null reichenden KI-Linien zu erkennen. Auffällig ist für alle Flächen die Konstanz der Herbsttemperaturen. Auf Jahresebene ist auf allen Flächen die Temperatur signifikant angestiegen, am höchsten fiel die Steigerung in Mittel- (K4) und Ostpolen (K5) aus.

Die Niederschläge im Beobachtungszeitraum sind im Vergleich zur Temperaturentwicklung mit wesentlich höheren interannuellen Varianzen behaftet. Weder für das Gesamtjahr noch für die Jahreszeiten war auf irgendeiner Fläche eine statistisch signifikante Veränderung seit 1951 festzustellen. Im Unterschied zu den Temperaturen ist jedoch das Konfidenzintervall der Steigung im linearen Trend am größten für den Sommer, die Schwankungsbreite liegt hier etwa dreimal so hoch wie im Winter und etwa um die Hälfte höher als im Frühling und Herbst.

Über die rein statistische Ebene hinaus sind Klimaänderungen dann von besonderer Relevanz, wenn sie Umfang und Qualität der menschlichen Nutzung von Ökosystemen beeinflussen. Ein Beispiel für derartige Größen ist die "Grünlandtemperatursumme 200" (GTS200, KÄTZEL 2008), die zum Beispiel den Aussaatzeitpunkt von Mais maßgeblich steuert. Sie wird quantifiziert durch den Kalendertag, an dem die speziell gewichteten positiven Tagesdurchschnittstemperaturen kumuliert den Wert 200 überschreiten. Abb. 5-89 stellt den Kalendertag des Erreichens der GTS200 an den Klimastationen der Kernflächen (Tab. 3-6, Seite 86) sowie im Mittel der Referenzstationen (Abb. 3-26) für den Untersuchungszeitraum dar.

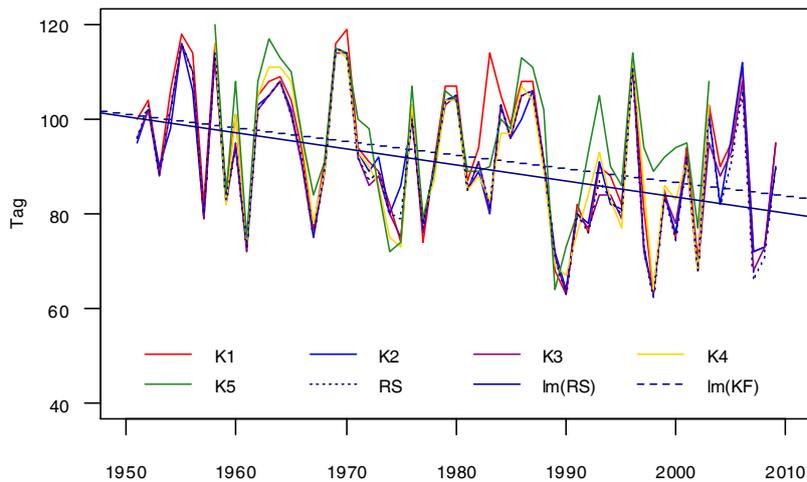


Abb. 5-89: Entwicklung der jährlichen Grünlandtemperatursumme 200 in Bezug auf den Tag im Jahr (Ordinate) für den Zeitraum 1951-2009 (Abszisse). Dargestellt sind die Daten der Stationen für die fünf Kernflächen K1-K5 sowie das Mittel der Referenzstationen (RS) zusammen mit den linearen Modellen (lm) des Mittels der Kernflächen (KF) und des Mittels der Referenzstationen.

Das Diagramm belegt eine relativ große Einheitlichkeit der Verlaufskurven untereinander mit oft etwas höheren Werten für die östlichste Fläche K5. Der lineare Ausgleich der Datenreihen zeigt fallende Trends sowohl für das Mittel der Kernflächen-Stationen (KF) als auch für das der Referenzstationen. Seit Beginn der 1950er Jahre hat sich demnach der Zeitpunkt des Erreichens der GTS200 vom 100. Kalendertag, der dem 09.04. entspricht, bis heute im Durchschnitt auf den 80. Tag, das heißt auf den 21.03. vorverlagert. Die hohe interannuelle Streuung der Werte für die Wintertemperaturen (siehe Abb. 5-88) belegt, dass es durchaus trotzdem noch lange, kalte Winter geben kann. Die Gefahr von Vegetationsschäden durch Spätfröste wird für Brandenburg mehrfach hervorgehoben (KÄTZEL 2008; LÖFFLER 2011). In Verbindung mit der durch Abb. 5-88 belegten hohen Variabilität der Wintertemperaturen in den letzten Jahrzehnten bleibt sie ein wichtiger Faktor bei der Anpassung der Landnutzung an den fortschreitenden Klimawandel.

Eine weitere Bestätigung gerichteter Veränderungen der Witterungsverhältnisse im Untersuchungsgebiet "aus Sicht der Pflanze" liefern phänologische Beobachtungen, zum Beispiel des Blattaustriebs im Frühjahr. Vergleiche aktueller Aufnahmen unter anderem auf K1 und K3 mit detaillierten Aufzeichnungen von WIMMENAUER aus den Jahren 1885-1894 zeigen – bei regionalen Unterschieden – einen im Durchschnitt acht bis zwölf Tage früheren Austrieb in der Gegenwart (LÖFFLER 2011). Bei Betrachtung der Brandenburger Verhältnisse insgesamt zeigt sich sogar eine Verlängerung der Vegetationsperiode von im Mittel 20 Tagen¹ zwischen dem Blühbeginn der Salweide und der beginnenden Verfärbung der Stieleiche im Herbst über den Zeitraum 1951-2008 (HAGGENMÜLLER & LUTHARDT 2009). Neben dem zeitigeren Beginn des Frühlings trägt ein immer späterer Übergang vom Herbst zum Winter zu dieser deutlichen Verlängerung bei. Auch europaweit sind diese Trends zweifelsfrei belegt (MENZEL & FABIAN 1999).

¹ Dieser Wert korrespondiert eng mit den für die Grünlandtemperatursumme 200 etwas weiter oben geschätzten 20 Tagen, um die sich das Erreichen dieser Größe seit 1951 vorverlagert hat (siehe Abb. 5-89).

Die monatsbezogenen Auswertungen des Witterungs-Zuwachs-Komplexes haben für auffällig viele Flächen einen signifikant positiven Einfluss der Juni-Niederschläge auf den Jahringindex nachgewiesen. Analysen mit gleitenden Intervallen zeigten außerdem, dass dieser Effekt zum Ende des Zeitraums 1951-2006 an Bedeutung zunimmt. Es liegt nahe, einen Grund dafür in der Entwicklung des Niederschlags und allgemein in der Witterung dieses Monats zu suchen. Abb. 5-90 untersucht deshalb die kombinierte Wirkung von Temperatur und Niederschlag anhand des Trockenheitsindex nach DE MARTONNE (1926), um mögliche Veränderungen über der Zeit zu identifizieren (siehe Formel 3-12, Seite 88).

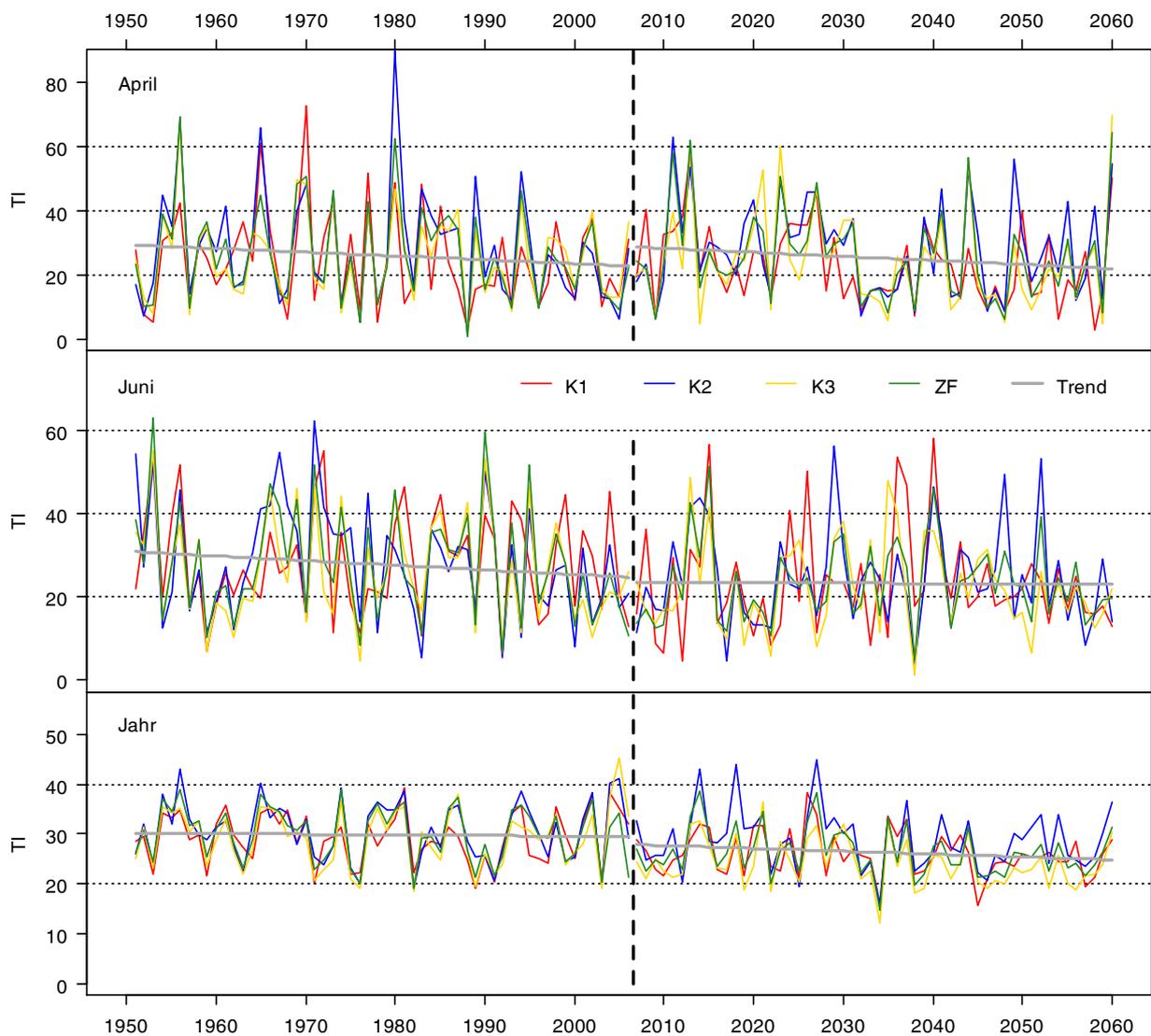


Abb. 5-90: Trockenheitsindex für die Monate April und Juni sowie das gesamte Jahr über die Perioden 1951-2006 (Referenz) und 2007-2060 (Szenario) für die Flächen K1, K2 und K3 sowie für die Zusatzflächen (ZF). Zusätzlich sind die linearen Trends der Mittel aus den vier Einzelzeitreihen in den durch eine senkrechte Strichlinie getrennten Perioden dargestellt.

Die Diagramme in Abb. 5-90 stellen links und rechts des senkrechten Trennstrichs zwei verschiedene Perioden dar. Die Werte der Jahre 1951-2006 beruhen auf Messwerten, dieser Zeitraum wird deshalb als *Messzeitraum* beziehungsweise *Referenz* bezeichnet. Die Werte im *Szenariozeitraum* von 2007 bis 2060 ergeben sich aus den Projektionen des STAR-2-Szenarios bei mittleren Feuchteverhältnissen und Annahme einer Temperaturzunahme um zwei Kelvin bis 2060 (siehe auch 3.4.1, Seite 85). Entsprechend der Berechnungsweise des Trockenheitsindex zeigen niedrige Werte eine höhere Belastung durch Trockenheit an. Seine Entwicklung über der Zeit lässt zum Beispiel im Juni des Kalibrierungszeitraums sowie im Vergleich der Kalibrierungs- mit der Szenarioperiode für das Gesamtjahr einen Trend erkennen, der zwar nicht signifikant erscheint, aber in Richtung größerer Trockenheit weist. Auffällig ist jedoch, dass sich zum Beispiel die tendenzielle Abnahme des Trockenheitsindex im Juni im Messzeitraum 1951-2006 im Szenariozeitraum nicht fortsetzt (siehe Abb. 5-90 Mitte). In ähnlicher Weise gilt das im April, wo sich zwar für die Zukunft wie in der Vergangenheit ein fallender Trend zeigt, die Mittelwerte für den Trockenheitsindex jedoch gleich bleiben.

Da die zukünftigen Witterungsbedingungen nach dem hier angenommenen Szenario von in der Jahressumme annähernd gleichbleibenden Niederschlägen geprägt sein werden, ist neben deren absoluter Menge auch ihre Verteilung innerhalb des Jahres interessant, wenn die ökologischen Abhängigkeiten beurteilt werden sollen. Die zu Monaten verdichteten Witterungsdaten können – siehe oben – nur unvollständige Informationen über diese Verteilung liefern. Deshalb soll im Folgenden auch der tagesgenaue Verlauf von Witterung und Temperatur analysiert werden. In Abb. 5-91 sind dazu die Bilanzen, das heißt die Differenzen zwischen den kumulativen Verläufen von Niederschlag und Temperatur über dem Kalendertag dargestellt. Über dem 30. April ist zum Beispiel die Differenz der Summen aller Tagesniederschlagssummen bis einschließlich dieses Tages zwischen Szenariozeitraum und Messzeitraum beziehungsweise Referenz dargestellt (oben). Die Temperaturbilanz (unten) zeigt die Differenz zwischen den Summen aller Tagesmitteltemperaturen bis zu diesem Tag. Wegen besserer Übersichtlichkeit ist hier von den Szenariodaten die Differenz zwischen den Jahresmitteltemperaturen von Szenario und Referenz abgezogen (damit beeinflusst die dem STAR-2-Szenario "2K" immanente stetige Erhöhung der Jahresmitteltemperaturen die Grafik nicht).

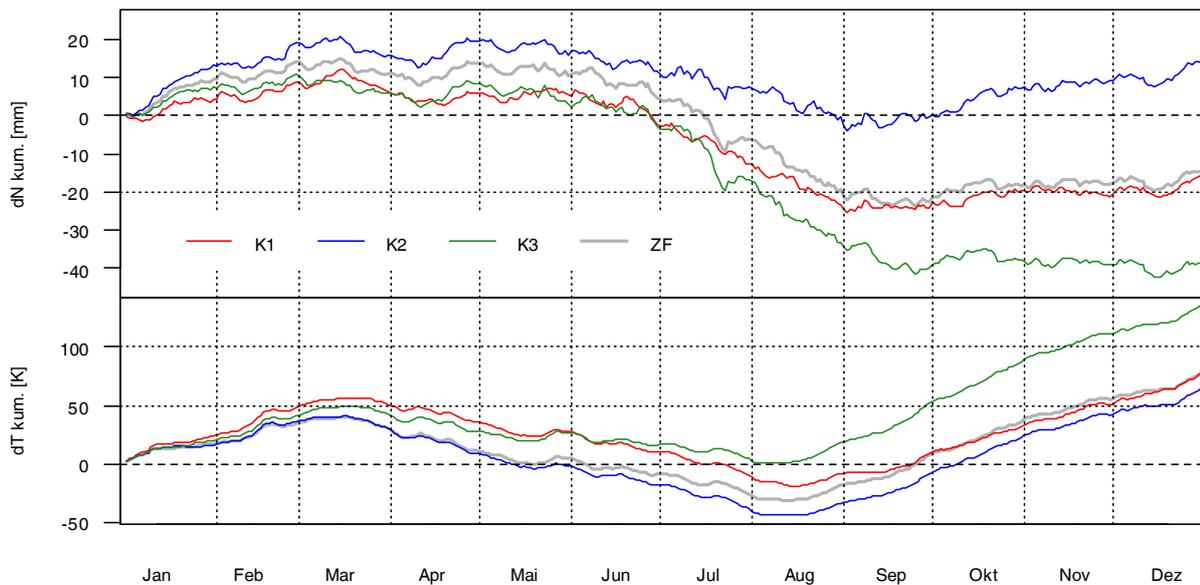


Abb. 5-91: Kumulative Bilanzen von Niederschlag (N; oben) und Temperatur (T) im Jahresverlauf als Differenzen zwischen den Tagesmittelwerten im Szenario- (2007-2060) und Referenzzeitraum (1951-2006) für die deutschen Kernflächen (K1-K3) und die Zusatzflächen (ZF). Die Szenariodaten sind aus dem Medianlauf im 2-Kelvin-Szenario des PIK (SRES-Szenario A1B) abgeleitet. Zur besseren Darstellung der Temperaturdifferenzen wurde von den Szenario-Tageswerten die Differenz zwischen den Jahresmitteln (Szenario-Referenz) abgezogen.

Bei der Interpretation von Abb. 5-91 ist zu beachten, dass mit der Zeit steigende Kurvenabschnitte durch höhere Werte im Szenario als in der Referenz entstehen, fallende Kurvenabschnitte entsprechend aus höheren Werten im Referenzzeitraum. In der Summe zeigt sich ein von deutlichen Phasen geprägter Jahresverlauf:

- Die Niederschläge nehmen vor allem in den Monaten Juni bis September deutlich ab, sie erhöhen sich von Mitte Dezember bis Mitte März und bleiben in der übrigen Zeit in etwa stabil.
- Von Mitte August bis Mitte März sind zukünftig höhere Temperaturen als in der Vergangenheit zu erwarten, während die Mittelwerte in der restlichen Zeit gleich bleiben bis leicht sinken;

In Kombination der beiden Witterungsgrößen ergibt sich für Mitte Dezember bis Mitte März eine Zeit, in der sowohl die Temperaturen als auch die Niederschläge nach dem Szenario höher liegen als in der Referenzperiode. Dies könnte sich auf Grund der physiologischen Grundlagen der Kambialentwicklung (FRITTS 1976) fördernd auf die Jahrringbreite auswirken. Von Mitte August bis Ende September könnten jedoch bei zukünftig steigenden Temperaturen die Niederschläge abnehmen und damit zu intensiveren Trockenheitsbelastungen in dieser Zeit führen. Die Jahrringbildung ist dann zwar schon abgeschlossen, nach 4.3.4, Seite 145 (siehe auch Abb. 4-80) wirkt sich der Spätsommer über die Bildung von Reservestoffen jedoch auf das Folgejahr aus. Auch für diesen Zeitabschnitt sind demnach Konsequenzen für die Jahrringbreite zu erwarten. Die Gesamtwirkung der zukünftigen

Witterung kann mit Diagrammen wie in Abb. 4-86 dargestellt werden, Aufschluss über den prozentualen Anteil der einzelnen zuwachswirksamen Zeiträume kann zum Beispiel eine Einzeljahresanalyse geben (SCHRÖDER & BECK 2009).

Im regionalen Vergleich zeigen sich vor allem in der Niederschlagsentwicklung auffällige Unterschiede zwischen dem Nordwesten (K1), dem Südwesten (K2) und dem Osten (K3) Brandenburgs. Während nach dem Szenario für K2 die Niederschläge leicht steigen, sinken sie für K1 um knapp 20 und für K3 sogar um knapp 40 mm pro Jahr. Die Temperaturen erhöhen sich in umgekehrter Reihenfolge am stärksten für K3, am wenigsten für K2. Die für die Zusatzflächen berücksichtigten Stationen (vergleiche Abb. 3-26, Seite 88) ordnen sich im Mittel auf dem Niveau von K1 ein.

Für das tatsächliche Verhalten der Bäume wird zusätzlich zu den hier dargestellten Trends auch wichtig sein, in welcher Intensität und Frequenz Extremperioden, vor allem Trockenphasen, auftreten werden. In jedem Fall ist der Schritt von monatsbezogenen Betrachtungen hin zu tagesgenauen Analysen wichtig, um die zu erwartenden Baumreaktionen zutreffend verstehen und mathematisch beschreiben zu können.

5.1.2 Dendroökologische Methodik

Die biologische Basis für *dendrochronologische* Untersuchungen besteht in der Möglichkeit, einzelne Wuchsphasen der Bäume voneinander abgrenzen und anhand charakteristischer Abfolgen von Größenunterschieden datieren zu können (FRITTS 1976; ESPER et al. 2004). Dazu bedarf es ökologischer Faktoren, die wuchsbegrenzend wirken und charakteristische Wachstumsunterbrechungen verursachen, wie sie in Mitteleuropa durch die Winterruhe der Bäume gegeben sind. Um *dendroökologische* Zusammenhänge zwischen Umwelteinflüssen und dem Zuwachs quantifizieren zu können, ist außerdem eine statistisch signifikante Korrelation nötig zwischen einem oder mehreren Minimumfaktoren und der Jahrringbreite. Bereits zu Beginn diesbezüglicher Forschungsarbeiten vor etwa einhundert Jahren ist deshalb darauf hingewiesen worden, dass Datierungen, Klimarekonstruktionen und Untersuchungen des Witterungs-Zuwachs-Komplexes am aussichtsreichsten an den Vorkommensrändern beziehungsweise Grenzbereichen der Baumarten durchzuführen sind (FRITTS 1976, siehe Abb. 5-92). Dort ist die Verfügbarkeit der für das Wachstum notwendigen Ressourcen so begrenzt, dass "sensitive" Jahrring-Zeitreihen gebildet werden und nach entsprechender Modellierung begründete Rückschlüsse von Jahrringbreitenunterschieden auf Schwankungen der Witterungsbedingungen möglich sind¹. Dies gilt für die vertikale Schichtung der Lebensbedingungen sowie vor allem für die geographische Verteilung von

¹ FRITTS (1976) weist allerdings auch auf die Grenzen der Beprobung von Extremstandorten hin: Wenn bei der testweisen Analyse erster Bohrkerne nicht nur in seltenen Ausnahmen ausgefallene oder extrem schmale Jahrringe ohne auswertbare Variation auftreten, die eine zuverlässige Datierung ebenso erschweren wie eine sinnvolle Modellbildung, dann ist dieser Bestand nicht für dendroökologische Auswertungen geeignet. Ein eindrückliches Beispiel für die Analyse von Extremstandorten bietet SCHILDBACH (2010), der das Wachstum von Bäumen auf Felsriffen im Elbsandsteingebirge untersuchte. In einzelnen Fällen konnte er dabei Abschnitte im Zuwachsverlauf mit bis zu 30 mindestens in Teilen des Umfangs fehlenden Jahrringen nachweisen.

Nord nach Süd beziehungsweise von humiden zu semiariden und ariden Wuchsverhältnissen. In überdurchschnittlich feuchten und milden Gebieten entstehen von Baum zu Baum häufig zufällig schwankende Jahrringe mit "complacentem" Verlauf (SCHWEINGRUBER 1983), die keine Rückschlüsse auf die Witterung in der Vergangenheit zulassen.

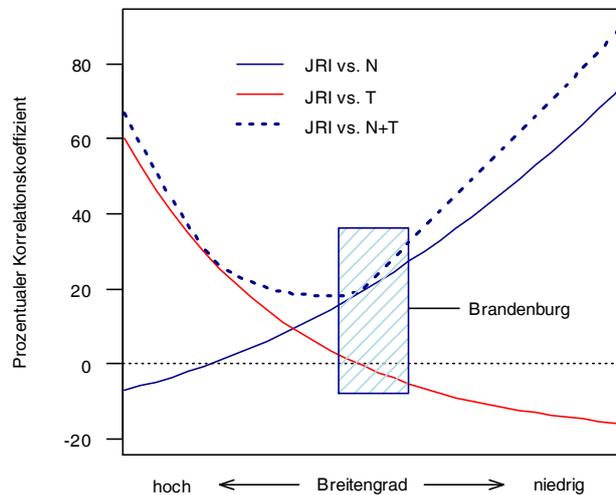


Abb. 5-92: Schematische Darstellung der möglichen Korrelationen zwischen dem Jahrringindex (JRI) und den einzelnen Witterungsfaktoren Temperatur (T) beziehungsweise Niederschlag (N) sowie den kombinierten Faktoren (N+T) in Abhängigkeit von der geographischen Lage (Breitengrad) des Untersuchungsgebiets (nach FRITTS 1976, leicht verändert). Mit zunehmender Entfernung von den Polen steigt die Abhängigkeit des Wachstums vom Niederschlag, während die Temperaturabhängigkeit abnimmt, bis sie zu einer negativ wirkenden Größe wird. Das schraffierte Rechteck deutet den Bereich der Faktorenkombinationen an, die in Brandenburg vorkommen.

Unter den in Brandenburg derzeit gegebenen Wuchsbedingungen sind nach Abb. 5-92 keine überdurchschnittlich engen stochastischen Beziehungen zwischen den untersuchten Witterungsparametern und den Zuwachsraten der beprobten Bäume zu erwarten. Die von FRITTS (1976) dargestellten Zusammenhänge dienen zwar nur zur allgemeinen Orientierung und lassen zum Beispiel bodenkundliche Aspekte völlig außer Acht. Das Untersuchungsgebiet stellt aber für die Trauben-Eiche weder einen Grenzbereich ihrer Verbreitung dar noch etwa ein "leading edge" oder "receding edge" im Sinne möglicher Arealverschiebungen im Zuge des Klimawandels – jedenfalls nicht in absehbarer Zeit (HAMPE & PETIT 2005, siehe auch 2.4.2). Vor diesem Hintergrund sind die im Ergebnisteil belegten Gleichläufigkeiten und Korrelationen zu sehen, die zwar relativ hoch sind, durch die verhältnismäßig geringe Sensitivität aber relativiert werden. Die Witterung beeinflusst zwar den Zuwachs, der Rahmen, in dem sich dessen Schwankungen bewegen, ist jedoch als eher moderat und nicht als kritisch für die Aufrechterhaltung der Vitalfunktionen der Bäume einzuschätzen.

Der großflächigen Übertragbarkeit der Modellergebnisse zum Beispiel aus CLIMTREG stehen die jeweils prägenden mikrostandörtlichen Bedingungen entgegen, die kleinflächig besonders positive oder negative Bedingungen für Wachstum und Vitalität schaffen können (HAMPE & JUMP 2012). Da die Bohrkernentnahmen in andere, auf mittlere Standortverhältnisse angewiesene Untersuchungen eingebettet waren, konnte eine bewusste "site selection" für optimale dendroökologische Analysen, wie FRITTS (1976) sie fordert, nur sehr begrenzt erfolgen. Eine vollständige und belastbare Gesamt-Chronologie für den Südosten Brandenburgs lässt sich aus den einzelnen Standortchronologien nicht erstellen, dazu sind

die untersuchten Flächen zu unterschiedlich und die räumliche Repräsentanz unzureichend. Die Weiserjahre, die mit dem Verteilungsansatz (4.2.6, Seite 126) für Kern- und Zusatzflächen identifiziert wurden, lassen sich dagegen gut mit den Ergebnissen bisheriger Studien vergleichen und in zukünftige Untersuchungen integrieren. Im gegebenen Rahmen und bei Berücksichtigung der genannten Einschränkungen ist der jahrringzentrierte Ansatz, wie er zur Analyse der Witterungswirkungen hier verwendet wurde, trotzdem als sehr potentes Hilfsmittel und taugliche Handlungsgrundlage gerade für retrospektive Analysen einzuschätzen. Methodische Fragen zur Übertragbarkeit gefundener Modellbeziehungen, sowohl räumlich als auch zeitlich (Extrapolation), werden im Abschnitt 5.3.2 diskutiert.

5.1.3 Versuchsflächen und Wuchsverhalten

Die als Untersuchungsbasis gewählten Versuchsflächen hatten den großen Vorteil, dass sie für das Projekt "OakChain" (ELMER et al. 2009) bereits eingerichtet und hinsichtlich der waldwachstumskundlichen Daten mit mindestens einer Aufnahme vollständig aufgenommen waren. Auf Grund ihrer geographische Lage und ökologischen Eigenschaften (Baumartenzusammensetzung, Altersstruktur, Mischungsform) wurden einige von ihnen im Verbundvorhaben "INKA-BB" weiterbearbeitet (GUERICKE et al. 2010). Vor allem die Kontinentalitätssequenz der Kernflächen spiegelt die zentrale Untersuchungsfrage von "OakChain" wider: Es sollte geklärt werden, welche Vitalität und Wuchsleistungen Eichenpopulationen zeigen, die sich unter Standortverhältnissen entwickelt haben, die schon heute den von den Klimaszenarien für Brandenburg skizzierten Bedingungen in 50-100 Jahren nahekommen. Den aktuellen standörtlichen Gegebenheiten in Ostpolen wurde unterstellt, in etwa die Verhältnisse vorwegzunehmen, die der Klimawandel in Brandenburg zukünftig erzeugen könnte. Ein Gradient von in den anderen Eigenschaften möglichst ähnlichen Versuchsflächen sollte dann vergleichende Untersuchungen zu den Beziehungen zwischen Standort, sozialen Verhältnissen beziehungsweise Konkurrenz sowie Vitalität und Zuwachs erlauben (SCHRÖDER et al. 2007a).

In Auswertung der "OakChain"-Daten hat sich gezeigt, dass die Annahme steigender klimatischer Kontinentalität von West nach Ost, von K1 bis K5 zwar zutrifft, dass sich aber die Menge und die Verteilung der Niederschläge in dieser Sequenz nicht ähnlich homogen verändern. Abschnitt 3.1.2 und Tab. 3-3 machen deutlich, dass die stärkste Belastung durch mangelnde Wasserverfügbarkeit gerade in der Vegetationsperiode auf den Flächen K1 und K3 gegeben ist. Es war weder für "OakChain" noch im Rahmen dieser Arbeit möglich, als Reaktion auf diese Erkenntnisse neue, von trockeneren und heißeren Sommern geprägte Versuchsbestände außerhalb Brandenburgs zu finden und dort Testflächen zu etablieren. Der Ansatz, auf den Klima- und Standortwandel als "*biome shift*" (das heißt auf die räumliche Verlagerung von Wuchsbedingungen und Pflanzengesellschaften) zu reagieren, wird in Brandenburg aktuell vor allem auf Basis von Herkunftsversuchen unter anderem zur Trauben-Eiche weiter verfolgt. Zusätzlich wird die Eignung von Baumarten wie Flaum- und Zerr-Eiche für den Anbau in Brandenburg geprüft, deren Herkunfts- und Hauptverbrei-

tungsgebiet in Süd- und Südosteuropa liegt (KÄTZEL et al. 2012). Das Festhalten an den Kernflächen auch für diese Arbeit ist demnach zum einen darin begründet, dass vergleichbare Daten in dieser Detailtiefe und Vielfältigkeit für andere Flächen nicht zur Verfügung standen. Zum anderen aber kann man – im Bewusstsein der oben beschriebenen Einschränkungen – den geographischen Gradienten für vergleichende Betrachtungen der sich doch deutlich unterscheidenden Standorte weiterhin nutzen.

Eine weitere Folge des Forschungsansatzes im "OakChain"-Projekt ist die Fokussierung auf Mischbestände aus Trauben-Eiche und Kiefer. Sie stehen deswegen im Mittelpunkt auch dieser Arbeit, weil sie einerseits einen bedeutsamen Ausschnitt der potentiellen natürlichen Vegetation im Untersuchungsgebiet repräsentieren. Andererseits ist die langfristige forstliche Planung in Brandenburg darauf ausgerichtet, den Anteil dieses Bestandstyps zukünftig deutlich zu erhöhen: Die heute etwa 60.000 Hektar Eichenfläche in Rein- und Mischbeständen sollen bis Mitte des Jahrhunderts auf rund 160.000 Hektar gesteigert werden (MLUR 2004; MLUV 2005; LFE 2007).

Die etwa gleichaltrige, einzelstamm- bis kleinflächenweise Mischung von Eichen und Kiefern führt wegen des stärkeren Jugendwachstums der Kiefer zu einem Wuchsvorsprung für diese Baumart und zu einer Dämpfung des Eichenwachstums. Dieser Effekt kann – mehr oder weniger ausgeprägt – auf allen Kernflächen anhand der Entwicklung des jährlichen Radialzuwachses nachgewiesen werden. Abb. 5-93 stellt die Mittelkurven der Bohrkernproben im herrschenden Bestand der beiden Baumarten einander gegenüber.

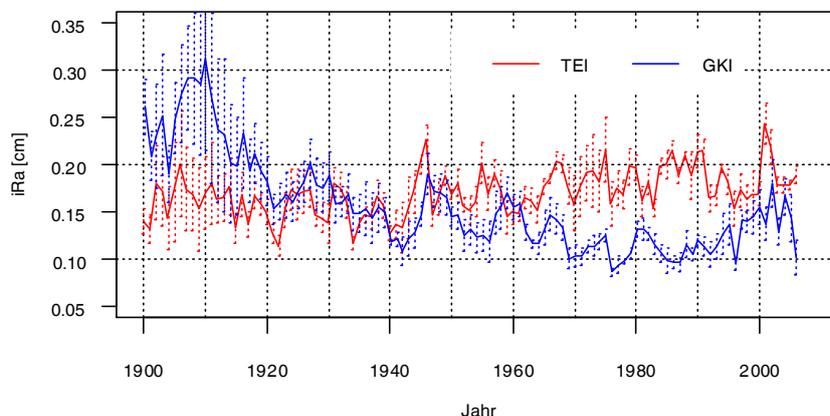


Abb. 5-93: Verlauf des jährlichen Radialzuwachses (iRa) für Eiche (TEI) und Kiefer (GKI) im Mittel der Bohrkernproben aus dem herrschenden Bestand von K1 bis K5. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwerts wieder.

Die von NOACK (2006; 2009) ausführlich für Brandenburger Verhältnisse quantifizierten Wachstumsverzögerungen bei Trauben-Eiche im Unterstand beziehungsweise Voranbau unter Kieferschirm sind für das Zuwachsverhalten auf einem Großteil der Kern- und Zusatzflächen mit verantwortlich zu machen (Abb. 4-43). Ein großer Teil der Differenzen in den Zuwachsleistungen zwischen den Flächen ist vor dem Hintergrund der verbreiteten Mehrschichtigkeit und der oft intensiven Mischung der Baumarten zu interpretieren: Unterschiedliche Alter, BHD-Verteilungen und Mittelwerte führen zu jeweils anderen Koeffi-

zienten der Zuwachsgeraden. Einflüsse der Standortqualität werden von diesen Faktoren überlagert und waren wegen des begrenzten Umfangs zur Verfügung stehender Versuchsfelder auch im OakChain-Projekt nicht befriedigend herauszuarbeiten (SCHRÖDER 2009a). Da aber bereits jetzt nach den Aussagen der zweiten Bundeswaldinventur mehr als die Hälfte der Bestände in Brandenburg, an denen die Eiche signifikant beteiligt ist, mit anderen Baumarten gemischt sowie mehrschichtig ist, wird die Konzentration auf strukturreichere Mischbestände für diese Arbeit als gerechtfertigt erachtet (MLUV 2005).

Die Mischung der untersuchten Eichen mit Kiefer erschwert ebenso wie die verbreitete Ungleichaltrigkeit auf den Kern- und Zusatzflächen die quantifizierende Einordnung ihrer Wuchsleistungen im Vergleich mit Ertragstafelangaben. Generell setzt die Anwendung von Ertragstafeln neben Homogenität in Alter und Struktur auch die Ähnlichkeit in der Behandlungsstrategie voraus, speziell im Durchforstungsverfahren (WENK et al. 1990). Dessen Einfluss ist zum Beispiel in der Ertragstafel nach ERTELD (1963) für Eiche daran zu sehen, dass der Grundflächenmitteldurchmesser im verbleibenden Bestand über die gesamte modellierte Zeitspanne (20-200 Jahre) um eine konstante Rate steigt¹. Die Abweichungen der Jahrringbreitenentwicklung auf den Versuchsfeldern vom Ertragstafelgang, wie sie in der Abb. 4-40 (Seite 107) zu sehen sind, deuten auf sich verändernde Umweltbedingungen und Konkurrenzeinflüsse, aber auch auf eine forstliche Behandlung hin, die von den Ertragstafelempfehlungen zumindest zeitweise abgewichen ist.

Im Vergleich von Kern- und Zusatzflächen fällt auf, dass der mittlere Verlauf der Zusatzflächen bis auf die letzten zwei Jahrzehnte etwas oberhalb dem der Kernflächen liegt (Abb. 4-42). Als Ursachen können zum einen Standortunterschiede angenommen werden, zum anderen begünstigte die waldbauliche Behandlung auf einer Reihe von Zusatzflächen die Eichen eventuell mehr als auf den Kernflächen². Auf Grund der großen Streuung zwischen den einzelnen Flächen sind die Differenzen der Mittelkurven jedoch nicht signifikant.

Die spezifische Wuchssituation und der entsprechende Zuwachsverlauf haben die Entwicklung der Probestämme für die Bohrkernanalysen entscheidend beeinflusst. Man kann nicht ohne Weiteres davon ausgehen, dass die bei der Probenahme als herrschender Bestand eingeordneten Individuen während ihres gesamten Lebens zu den Bäumen gehörten, die nur minimal von Konkurrenz und anderen zufälligen "Nicht-Klima"-Einwirkungen betroffen waren. Der häufig geäußerten Forderung, für Analysen des Witterungs-Zuwachskomplexes nur vorherrschende Bäume zu nutzen (FRITTS 1976; SPEER 2010), konnte für diese Arbeit auf Grund der Heterogenität der Bestände und des Einflusses der Kiefer nur bedingt entsprochen werden. Prozesse des natürlichen "Umsetzens" zwischen den Baumklassen nach KRAFT (1884) können sich im Lauf des Lebens bis zur Probenahme ebenso vollzogen haben wie Durchforstungseingriffe, die zu sozialen Verschiebungen geführt ha-

¹ ERTELD (1962) begründet diese Festlegung explizit mit den wirtschaftlichen Vorteilen, die sich durch Eichenholz mit möglichst gleichmäßigen, relativ geringen Jahrringbreiten erzielen lassen, und beschreibt das zur Steuerung der konstanten Dickenzunahme nötige Durchforstungsregime ("Hochdurchforstung zunehmender Stärke mit Festlegung von Zukunftsstämmen").

² Einige Zusatzflächenbestände stocken auf nährstoffkräftigeren Böden (Buc6159, HF5506, KS6126, Sch5192), ein Teil weist nur geringe Dichten der Kiefer im Schirm auf (FE77, FE95, KS6132); siehe auch Tab. 3-2, Seite 59.

ben (CARRER 2011; NOACK 2011). Letzteres ist vor allem für ertragstafelgerecht hochdurchforstete Eichenreinbestände zu erwarten, die in dieser Arbeit untersuchten Mischbestände sind in dieser Hinsicht weniger beeinflusst (zur Bestandesgeschichte siehe 3.1.3, Seite 64).

Hinsichtlich der Repräsentationskraft der Stichproben für die betreffenden Populationen belegen die in Tab. 4-14 auf Seite 122 dargestellten hohen EPS-Werte eine so gut wie überall anzunehmende vollständige Übertragbarkeit. Das niedrige EPS in der Stichprobe aus dem beherrschten Bestand der Fläche K2 weist jedoch auf eine große Variabilität der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen zwischen den Bäumen dort hin, die außerdem nicht durch einen ausreichend großen Stichprobenumfang abgesichert wurde. Die nach der Eliminierung von drei nicht typischen Wuchsverläufen verbleibenden neun Bäume zeigen auch in der Gleichläufigkeit sowie in der Anzahl vollständig paralleler Jahre deutlich niedrigere Werte als alle anderen Stichproben (Tab. 4-15, Seite 123). Einzig die beherrschten Bäume von K5 weisen eine ähnlich geringe Parallelität auf, die aber erst in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts derart deutlich ausgeprägt ist.

Als Grund für die Uneinheitlichkeit in der Zuwachsreaktion auf K2 kann zum einen die dort etwas größere Wasserverfügbarkeit beziehungsweise der im Vergleich schwächere Trockenstress angenommen werden (siehe auch Abb. 5-92). Dazu kommt, dass die Altersverteilung dort uneinheitlicher und die Vielfalt von Wuchssituationen größer ist als zum Beispiel auf K3 und K4. Deutlich wird letzteres am Segregationsmaß nach PIELOU (1977), das bei Werten unter null eine Anziehung zwischen Baumarten in Mischbeständen, mit steigenden Werten über null eine Tendenz zu baumarthomogenen Teilflächen anzeigt. K2 weist mit 0,06 den niedrigsten Wert aller K-Flächen auf und ist damit durch eine innige Mischung von Trauben-Eichen und Kiefern gekennzeichnet, während sich K3 und K4 (0,55 / 0,13) tendenziell entmischt haben, was zu homogeneren räumlichen Wuchskonstellationen geführt hat (SCHRÖDER et al. 2009a). Auch Unterschiede in der genetischen Zusammensetzung der einzelnen Eichenpopulationen können eine Rolle spielen (siehe 5.2.2).

Die Aufbereitung der Stichprobeninformation durch den Ausschluss einzelner Bäume geschah lediglich im Vorfeld des "*pre-whitening*". Um die Witterungswirkungen noch deutlicher herauszuheben, könnte man den Beitrag der Einzelzeitreihen zum kollektiven Signal noch strenger prüfen, zum Beispiel durch einen Vergleich der arithmetischen Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten jeder Jahrringindex-Zeitreihe zu allen anderen. Auf der Fläche K1 weist der Baum 51 zum Beispiel keine Auffälligkeiten in der Entwicklung des relativen Durchmessers auf, der mittlere Korrelationskoeffizient seiner Jahrringindex-Zeitreihe zu denen der anderen Bäume liegt jedoch nur bei $r_q=0,412$. Vom Baum mit dem nächstliegenden r_q -Wert (0,559) unterscheidet sich der Baum nach einfachem t-Test signifikant, seine Entfernung aus der Stichprobe würde die mittlere Korrelation von $R_q=0,618$ auf 0,630 steigern. Da die Untersuchungen jedoch neben der Stärke der Witterungseinflüsse auch die Variabilität in den Versuchsbeständen herausarbeiten sollten, wurde auf derart weit gehende "Ausreißerbereinigung" verzichtet.

Die Einheitlichkeit im Wuchsverhalten zwischen den einzelnen Versuchsflächen lässt sich auch anhand der Korrelationen zwischen den Standortchronologien beurteilen. Dazu wird die Sozialklasse 1+2 herangezogen, da dort die Wahrscheinlichkeit für ein von Konkurrenz und ähnlichem unverfälschtes Klimasignal größer ist. Nach Tab. 4-13 sind die Chronologien von K1 und K3 am stärksten korreliert ($R = 0,50$), gefolgt von den Korrelationen K3-K5 (0,36), K2-K3 (0,34) und K4-K5 (0,32). Die geringste Übereinstimmung zeigen – wie zu erwarten – die am weitesten voneinander entfernten Kernflächen K1 und K5 (0,11). Erstaunlich ist neben den relativ geringen Korrelationen K1-K2 und K3-K4 (jeweils 0,30) der vergleichsweise hohe Wert für die knapp 500 km voneinander entfernten Flächen K3-K5 (siehe auch Anhang 8.4), der auf sogenannte "*teleconnections*", also überregional prägende Witterungseinflüsse schließen lässt (ROLLAND 2002).

Die Zusatzflächen zeigen Korrelationsmuster, die ihrer räumlichen Nähe entsprechen. Beispielhaft dafür stehen die sechs Versuchsflächen im Revier Fünfeichen in Ostbrandenburg (siehe Tab. 3-2, Seite 62). Das Mittel der Korrelationskoeffizienten untereinander liegt dort bei $R_q = 0,72$. Für die drei beziehungsweise vier Flächen der Reviere Dubrow und Kleinsee, die ähnlich nah zueinander liegen, beträgt der Mittelwert jeweils nur 0,47 und ist damit ungefähr gleich dem mittleren Korrelationskoeffizienten über alle Zusatzflächen hinweg ($R_q = 0,467$). Zur auffällig hohen Parallelität der Fünfeichen-Flächen trägt sicher bei, dass das Revier in der Region liegt, die anhand der K3 als am stärksten trockenheitsbelastet identifiziert wurde. Die dominierende Steuerungswirkung des verfügbaren Wassers auf die Jahringbreite schlägt sich folglich in einem sehr homogenen Klimasignal nieder.

5.2 Diskussion der Kernfragen

5.2.1 Vitalität und Kronenzustand

Der folgende Abschnitt diskutiert die bereits im Kapitel "Theoretische Basis" ab Seite 14 zusammengestellten grundsätzlichen Betrachtungen zu Vitalität und Anpassung im Licht der gefundenen Ergebnisse vor allem zum Kronenzustand und zu dessen Beziehungen mit dem Wuchsverhalten der Bäume. Dabei wird besonders auf die Problematik des Begriffs vom "Eichensterben" und auf die Skalenbedingtheit von Vitalitätsbeurteilungen eingegangen sowie darauf, welche Dimensionen bei der Anwendung des Vulnerabilitätskonzepts auf Gegenwart und Zukunft der Trauben-Eiche zu beachten sind.

Die praktische Anwendung und Interpretation der abstrakten Konzepte von Stress und Vitalität sowie ihre wesentlichen Begrifflichkeiten sind an bestimmte Skalenebenen in Raum und Zeit gebunden. Auf Ebene der Zelle und des Organismus ablaufender Stress kann auf der nächsthöheren Organisationsebene zu "Trainingseffekten", das heißt zu einer verbesserten Anpasstheit führen. Das Absterben einzelner Individuen als Folge ungenügender Anpassungsfähigkeit kann eine erhöhte Fitness der Population bewirken (evolutive Anpassung, KÄTZEL 2008). Definitionen für Begriffe wie Stabilität und Resilienz sind an gesell-

schaftliche Ansprüche an Ökosysteme sowie an anthropogene Zeithorizonte gebunden (HOLLING 1973; LUDWIG et al. 1997; DELANGE et al. 2010). Sie sind in der Regel Ausdruck des Anlegens anthropogener Maßstäbe an natürliche Prozesse und drücken aus, welche Systemveränderungen "akzeptabel" mit Blick auf die Funktionserfüllung erscheinen und ab wann sie als Umschlagen in eine neue Qualität, also als Überschreiten der Elastizität, gewertet werden. Von zunehmender Bedeutung in diesem Zusammenhang sind die sogenannten Ökosystemdienstleistungen ("*ecosystem services*") auf verschiedenen Ebenen, deren langfristige Erfüllung als Gradmesser zum Beispiel für Stabilität oder Resilienz genutzt wird (BRESHEARS et al. 2011).

Die je nach fachlichem Hintergrund zum Teil unterschiedlichen Definitionen zentraler Begriffe betreffen vor allem die Themen Elastizität und Resilienz (LÜPKE 2009; vergleiche auch Abb. 2-7 und Seite 23)¹. Für die weitere Auseinandersetzung wird empfohlen, die inhaltliche Trennung zwischen beiden Begriffen zu bewahren und bei ihrer Benutzung klar die Bezugsebenen räumlicher wie zeitlicher Art zu benennen. Elastizität ist als Fähigkeit zur Rückkehr zu einem ursprünglichen Zustand eher statisch orientiert, von Resilienz dagegen sollte dann gesprochen werden, wenn auch bei veränderter Systemkonstellation noch die wesentlichen Funktionen und Leistungen erwartet werden können. Wichtig für weitere Forschungen und die Anwendung des Resilienz-Konzepts ist seine Operationalisierbarkeit: *Worauf reagiert das System und wohin?* Ansätze dazu haben zum Beispiel ANGELER et al. (2010) für aquatische Ökosysteme beschrieben. Sie betonen die Dringlichkeit, neben der Untersuchung resilienten Verhaltens von sozialen und ökonomischen Systemen auch ökologische Zusammenhänge nach möglichst einheitlichen Maßstäben weiter zu analysieren.

Der Bezug auf eine bestimmte Skaleneinheit und der große Einfluss anthropozentrischer Bewertungsschemata sind auch prägend für das methodische Konzept der Vulnerabilitäts-Einschätzung, das eine enorme Spannweite hinsichtlich der Anwendbarkeit auf unterschiedlichste Systemebenen aufweist. Die enthaltenen Hauptelemente (Sensitivität und Exposition kombiniert zum "Impakt" in Wechselwirkung mit der Anpassungsfähigkeit) sind in der Regel auf allen Anwendungsebenen vorhanden. In dieser Form erleichtert das Konzept vor allem das *Verständnis* von Systemen. Nach GALLOPÍN (2006) kann jedoch die Exposition auch als unabhängig von der Vulnerabilität angesehen werden: Ein Waldökosystem mag nach dieser Definition zwar sehr vulnerabel gegenüber starke Stürme sein, solange derartige Ereignisse jedoch nicht eintreten, bleibt es stabil. Demnach wäre zu trennen in

- (a) Vulnerabilität im engeren Sinne als Systemeigenschaft, die sich aus Sensitivität und "*coping capacity*" (als Fähigkeit zum Umgang mit Störungen) zusammensetzt, und
- (b) die Exposition als Eigenschaft der Beziehung zwischen System und Umwelt.

¹ Der Begriff Elastizität spielt in der englischsprachigen Fachliteratur kaum eine Rolle, häufig wird skalenübergreifend von Resilienz gesprochen. Stellvertretend für die weitgehende Gleichsetzung der beiden Begriffe seien hier LLORET et al. (2011) zitiert: "*Resilience is broadly defined as the capacity of an ecosystem, community or individual to recover after disturbance and regain its pre-disturbance structure and function.*"

Ein solches Herangehen ist im Vergleich eher *handlungsorientiert*. Bei der Beurteilung der Vulnerabilität gegenüber Klimawandelfolgen zum Beispiel könnten die Systemeigenschaften in einem ersten Schritt unabhängig von der Exposition erfasst und dann mit Informationen zur möglichen Raum- und Zeitspezifität der Exposition (*exposure*) verschnitten werden. Begründet wird diese Trennung von GALLOPÍN (2006) damit, dass das Eintreten einer Störung (*perturbance*) weder im Zeitpunkt noch in der Intensität vorausgesagt werden kann. Die Exposition bleibt seiner Meinung nach immer erst einmal hypothetisch, da auch langandauernde Belastungen in der Zukunft sich nicht wirklich in ihrem Ausmaß und ihren möglichen Wirkungen abschätzen lassen. BLATT et al. (2010) übersetzen "*exposure*" mit "Betroffenheit" – das unterstreicht noch einmal, dass Standorteigenschaften wie Relief oder Bodenart nicht zur Exposition zählen, sondern als mögliche Prädisposition vielmehr der Sensitivität zuzuordnen sind. Sie weisen aber auch darauf hin, dass Störungen und längerfristige Belastungen sowohl dem naturwissenschaftlichen als auch dem gesellschaftlichen Bereich entstammen können.

Als wesentlichen Ursachen der walddynamischen Dynamik und Variabilität sind Störungen nicht unbedingt nur negativ zu beurteilen (OTTO 1994, WAGNER 2008). Sie können dazu beitragen, als nachteilig bewertete Systemzustände zu überwinden. Außerdem erzeugen gerade kleinflächige Störungen auf einer höheren Betrachtungsebene wie der Landschaft oder einem größeren geschlossenen Waldgebiet ein Mosaik unterschiedlicher Lebensräume. Für gesellschaftliche Systeme gilt dasselbe: "*It is possible to speak of positive vulnerability in cases where change leads to a beneficial transformation such as the emergence of a given social group from chronic poverty or the collapse of an oppressive regime*" (GALLOPÍN 2006). Im Umkehrschluss bedeutet das, dass ausgeprägte Elastizität auch negativ wirken kann, wenn zum Beispiel zum Erreichen eines vorteilhafteren Systemzustands große Widerstände überwunden werden müssen.

Nach der Einteilung von MANION (1981) kann das kombinierte Wirken von Störungen und längerfristigen Belastungen zu Komplexkrankheiten führen. Ob die für Trauben- und Stieleiche in den vergangenen Jahrzehnten europaweit beschriebenen Vitalitätseinbußen den Charakter einer Komplexkrankheit haben, wird von einigen Autoren bestritten. Nach FÜHRER (1998) sollte man in Bezug auf die Eichenschäden nicht von "*der Komplexkrankheit*" sprechen, sondern von einem "Komplex von Krankheiten", der in der konkreten Zusammensetzung regional und temporal unterschiedlich sein kann ("*[a] process driven by several 'diseases' involving site factors, environmental factors, pests, and pathogens*"). OSTRY et al. (2011) schlagen vor, die Kategorie "*decline*" (Sterben) zur Charakterisierung von Schädigungen nicht mehr zu benutzen und stattdessen die art- und standortspezifischen Wirkmechanismen zu benennen, sobald sie bekannt sind. Genauere Bezeichnungen tragen nach ihren Worten zu einem besseren Verständnis und stärker zielgerichteter Forschung bei. In Abänderung des Konzepts der "Todesspirale" von MANION (1981) regen OSTRY et al. (2011) an, zur Auseinandersetzung mit komplexen Schadsyndromen den methodischen Ansatz eines Krankheitsdreiecks ("*disease triangle*") zu benutzen (Abb. 5-94).

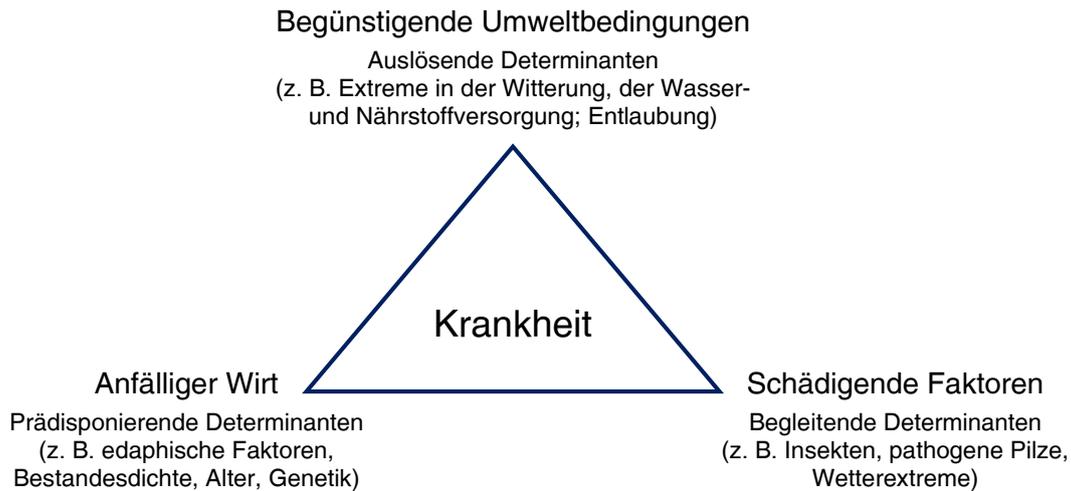


Abb. 5-94: Das "disease triangle" als Konzept zur Analyse von Komplexkrankheiten nach OSTRY et al. (2011)

Das Dreieck als methodische Figur macht es leichter als die Spirale, auffällige Vitalitätsstörungen nicht als unumgängliches "Todesurteil" zu verstehen, sondern erst einmal als Anzeichen von Stress, der durchaus auch überstanden werden kann (MOONEY et al. 1991)¹. Die Darstellung in Abb. 5-94 betont außerdem die Bedeutung der Interaktionen zwischen dem Baum als "Wirt" und seiner Umgebung. Der Baum kann diese Auseinandersetzung durch Anpassungsreaktionen zu seinen Gunsten beeinflussen ("Eustress", TESCHE 1991; MATYSSEK et al. 2010). Das gilt nicht nur auf der Ebene des Individuums, sondern auch für Populationen und die Art insgesamt (KÄTZEL 2008; SCOTTI 2010).

In dem beschriebenen Beziehungsgefüge zwischen Umwelt, Schadfaktoren und Wirtspflanze sind nach OSZAKO (2004) auch die Ursachen für die aktuellen Vitalitätsstörungen der Eiche zu suchen. Um derartige baumartspezifische Schädigungen korrekt einordnen zu können, ist es ganz wichtig, die Natur- und Kulturgeschichte (im Sinne von Nutzungsbeziehungsweise waldbaulicher Geschichte) einer Art oder eines Ökosystems zu kennen (FRANKLIN et al. 1987). In diesem Zusammenhang geben OSTRY et al. (2011) zu bedenken, dass bestandes- oder alterskohortenweise auftretende Absterbeerscheinungen nicht als "decline" im Sinne des "Sterbens" einer Baumart aufzufassen sind, sondern als natürlicherweise vorkommende Abschnitte in den multivariaten Lebenszyklen von Wäldern.

Aktuelle Vitalitätsprobleme können nach STREIT et al. (2011) auch daher rühren, dass die heutigen Altbäume aus dem 18. Jahrhundert stammen, das heißt durch die zu Ende gehende "Kleine Eiszeit" mit niedrigen Temperaturen nicht nur im Sommer geprägt wurden. Ihre Reaktionen auf die heutigen Bedingungen sind mindestens zum Teil durch die natürliche Auslese unter den damaligen Extrembedingungen und eventuell epigenetische Zusammenhänge bestimmt. Andererseits hat es immer wieder auch wärmere Perioden in der mitteleu-

¹ "Slow growth, branch dieback, and branch abscission are wellknown responses of trees to stress and are physiological survival mechanisms" (MOONEY et al. 1991).

ropäischen Klimageschichte gegeben (BEHRINGER 2010). Diese müssten über Auslese- und Anpassungsprozesse der jeweils vorhandenen Bäume ebenfalls ins "genetische Gedächtnis" der Eichen eingegangen sein. Es kann deshalb durchaus vorkommen, dass einzelne Bäume oder Bestände auf Grund ungünstiger Angepasstheit Vitalitätsprobleme haben, auf der Ebene der Art dürfte dies jedoch kaum eine Rolle spielen.

Die Elastizität von Individuen und Populationen gegenüber externen Stressoren hängt auch von den Standorteigenschaften ab, im engeren Sinne von der Bodenart, der Wasserversorgung und der Nährstoffverfügbarkeit. In Bezug auf die Vitalitätsprobleme der Eiche ist deshalb anzunehmen, dass der "Rückzug" von ungeeigneten Standorten einen nicht unwichtigen Teil der beobachteten Schäden erklärt. Er erfolgt umso deutlicher, je höher die Belastungen zum Beispiel durch Witterungsbedingungen und / oder Schadinsekten sind. Diese "Rückzugs-These" wird in Bezug auf die hohen Mortalitätsraten der Kiefer in den alpinen Trockentälern in den vergangenen Jahren unter anderem von BIGLER et al. (2006) und DOBBERTIN et al. (2007) sowie für flächig absterbende Aspe in Nordamerika von OSTRY et al. (2011) vertreten. Für die Stiel-Eiche sehen LANDMANN et al. (1993) die regionalen Absterbeerscheinungen in Frankreich als "*ecological sanction*" dafür, dass der Anbau der Eiche auch auf sandige, trockenheitsgefährdete Böden ausgedehnt wurde. Mit Blick auf die Versuchsflächen der vorliegenden Arbeit kann die These nicht direkt belegt werden. Die vergleichsweise hohen Kronenstrukturstufen und Laubverlustprozente auf den in der Vegetationsperiode trockensten Flächen K1 und K3 zeigen jedoch, dass der Standort nicht vollständig die Witterungsbelastungen kompensieren kann. Die Auswertung der Profilgruben auf den Flächen hat gezeigt, dass auf Grund von Lehmبändern in etwa 1,2-1,5 Metern Tiefe und der damit besseren Wasserrückhaltefähigkeit die Eichen auf K3 etwas günstigere Standortbedingungen haben als die auf einer Düne stockende K1 (ELMER et al. 2009).

Die relativ hohen Ausscheidungsraten auf K1 und K3 (siehe Tab. 4-9, Seite 104) sind zum Teil dadurch zu erklären, dass dort zu Beginn der Untersuchungen eine zweigipflige Verteilung der Brusthöhendurchmesser vorlag. Diese Zweischichtigkeit ist nun im Begriff sich aufzulösen, da überdurchschnittlich viele Exemplare aus der jüngeren, zwischenständigen Schicht entweder bereits abgestorben oder extrem geschwächt sind. Es kann angenommen werden, dass es sich hier auch um Spätfolgen der Extremsommer 2003 und 2006 handelt, die die schon unter normalen Witterungsbedingungen unter hohem Konkurrenzdruck durch die oberständigen Eichen stehenden schwächeren Exemplare besonders getroffen haben. Über die Kernflächen gemittelt liegt der Gesamtanteil natürlicher Mortalität von etwa 4,1 % in fünf Jahren etwas höher als der Wert, der in einer aktuellen Auswertung des Ausscheidungsgeschehens auf den Dauerbeobachtungsflächen des europäischen Level-I-Netzes für Eiche bestimmt wurde (KALLWEIT 2011, persönliche Mitteilung). Dort lagen die durchschnittlichen jährlichen Ausfälle von Trauben-Eichen über die Jahre 1999-2008 bei knapp 0,8 % beziehungsweise 3,1 % in fünf Jahren. Hauptgrund für diese Differenz sind die Windwürfe durch den Sturm "Kyrill" auf K4 im Januar 2007, während auf den Level-I-Beobachtungsflächen zur gleichen Zeit kein einziger Baum durch Sturm ausfiel. Andere Vergleichszahlen lassen sich aus den Waldzustandsberichten einzelner Bundesländer ent-

nehmen, in der Regel liegen sie bei etwa 0,1 bis 0,2 % als Mittel der Jahre 1984-2010 (in Extremjahren auch bis 0,9 %, vergleiche zum Beispiel HMUELV 2010 und NW-FVA 2011). Die Werte aus den Waldzustandserhebungen lassen sich jedoch zum einen wegen des Mischbestandscharakters und der geringen Zahl der Kernflächen und zum anderen wegen ihrer kurzen Beobachtungszeit nur sehr begrenzt zum Einordnen der Zahlen aus Tab. 4-9 heranziehen.

Das Thema "*growth or defense*" konnte auf der gegebenen Untersuchungsebene nicht angemessen bearbeitet werden, dazu wären viel detailliertere physiologische Analysen erforderlich. Der hier verfolgte Ansatz gutachtlicher Vitalitätsbeurteilung an Bäumen ist zu berücksichtigen, wenn man die Beziehungen zwischen Zuwachsverhältnissen und Kronenzustand auf den Versuchsflächen mit dem in Abschnitt 2.2.5 ab Seite 28 vorgestellten Modell von HERMS & MATTSON (1992) interpretieren möchte. Dieses Modell bezieht sich auf den relativen Zuwachs einer Pflanze. Für Bäume ist bei der Bestimmung relativer Zuwächse als "Zuwachsprozent" der betrachtete Parameter von entscheidender Bedeutung. Ihr sekundäres Dickenwachstum führt dazu, dass sich mit zunehmender Größe fast immer fallende Zuwachsprozente ergeben, da das Verhältnis von Radialzuwachs zu bereits vorhandenem Durchmesser in der Regel von Jahr zu Jahr geringer wird¹. Die Abb. 2-9, mit der HERMS & MATTSON ihr Modell des *trade-off* zwischen relativem Zuwachs und Sekundärstoffwechsel illustrieren, sollte also bei Anwendung auf Bäume eher für Vergleiche zwischen verschiedenen Zuständen bei gleicher Ausgangsdimension genutzt werden. Vergleicht man dagegen Individuen mit unterschiedlichem BHD, so werden schwächere Bäume aus rechnerischen Gründen oft einen höheren *relativen* Zuwachs haben, der aber noch nichts über das Maß ihres Abwehrpotentials aussagt.

Die Balance zwischen Wachstum und Verteidigung kann nicht isoliert von den externen Einflüssen gesehen werden, die auf den Baum einwirken. Dazu zählen auch die sozialen Interaktionen wie die Konkurrenz. MILLARD & WAY (2011) machen zum Beispiel darauf aufmerksam, dass Untersuchungen zu Abwehrverhalten, Wachstum und Ressourcenallokation möglichst kombiniert zu führen sind, um das komplexe Verhalten der Bäume in Ökosystemen unter dem Einfluss von Konkurrenz besser zu begreifen. Traditionell und wegen einer Reihe von Vorteilen (leichte Messbarkeit, Beteiligung am Aufbau aller Bausteine der Pflanze) steht der Kohlenstoff im Zentrum der physiologischen Analysen (BAZZAZ et al. 1987). Aus Beobachtungen fehlenden *trade-offs*, wenn Kohlenstoff für Wachstum und Verteidigung mehr als ausreichend vorhanden ist, schließen MILLARD & WAY (2011), dass als "Währung" des Austauschs zwischen verschiedenen physiologischen Bereichen auch der Stickstoff in Frage kommt. BAZZAZ et al. (1987) nennen zusätzlich Phosphor als Element, das die Entwicklung von Pflanzen begrenzen kann und näher analysiert werden sollte.

¹ In Ausnahmepetoden stark steigender Jahrringbreiten kann das Zuwachsprozent auch zunehmen, aber bei nur gering wachsenden und in jedem Fall bei konstanten oder sinkenden JRB fallen die jährlichen Zuwachsprozente. Das gilt sowohl für den Radial- als auch für den Grundflächen- und den Volumenzuwachs des Stammes.

Die These vom komplementären Verhältnis zwischen "*growth*" und "*defense*" ist auch vor dem Hintergrund der Waldschadens- beziehungsweise Waldzustandsbeurteilung von Bedeutung. Grundsätzlich besteht bei solcher Einschätzung ein Referenzbaumproblem (STERBA 1996; KÄTZEL 2003; EICHHORN et al. 2006): Dieser soll voll benadelt oder belaubt und von vorbildlicher Vitalität sein – vielleicht ist ihm das aber nur möglich, weil er einen Teil der sonst für das Wachstum benötigten Ressourcen in die Abwehr steckt. Wichtig ist es in diesem Zusammenhang auch, den Energie- beziehungsweise Ressourcenverbrauch zur Blüten- und Fruchtbildung zu berücksichtigen (HERMS & MATTSON 1991; EICHHORN et al. 2005). Hinter dem gutachtlich ansprechbaren Kronenzustand als Weiser für die Vitalität liegt so immer ein komplexes Allokationsgefüge, dessen Dimensionen von den Waldzustandserhebungen nicht vollständig erfasst werden können (ELLING & DITTMAR 2003).

Die Schwierigkeiten bei der Identifikation kausaler Beziehungen zwischen Umwelt und Pflanze soll ein Beispiel verdeutlichen. Die Theorie der "*carbon starvation*" erklärt negative Folgen von Hitzestress damit, dass die Spaltöffnungen der Blätter zu lange geschlossen sind und der für die Kohlenwasserstoffsynthese notwendige Rohstoff nur in unzureichender Menge in die Pflanze gelangen lassen (MCDOWELL et al. 2008; ADAMS et al. 2009; siehe Seite 12). Das Schließen der Spaltöffnungen ist primär eine Reaktion auf übermäßigen Verdunstungsanspruch. Dieser kann dadurch entstehen, dass bei sonst gleichbleibenden Bedingungen weniger Wasser zur Verfügung steht. Die potentielle Verdunstung steigt aber auch dann, wenn bei konstantem Wasserangebot die Temperatur zunimmt (KÄTZEL & LÖFFLER 2006). Bereits auf dieser relativ hohen Hierarchieebene kann also aus der Reaktion der Pflanze nicht direkt auf ihre Umweltbedingungen beziehungsweise auf den primären Stressoren geschlossen werden.

Letztendlich kann die Frage, mit welchem Vorzeichen und in welcher Stärke Jahrringbreite und Vitalität miteinander gekoppelt sind, nicht pauschal beantwortet werden. Zum einen ist die Antwort immer abhängig von der standortspezifischen Konstellation von Ressourcen, Belastungen und Störungen. Außerdem benötigt man zu ihrer Klärung mindestens eine zusätzliche Informationsebene in Form von Kenntnissen der physiologischen Verhältnisse, vor allem zur Konzentration von stressanzeigenden Verbindungen (KÄTZEL 2003). Sie sind unerlässlich, um bestimmen zu können, ob sich ein Baum mit niedrigen Jahrringbreiten bereits in Richtung seiner Toleranzgrenze bewegt oder ob lediglich das individuelle Gleichgewicht zwischen *growth or defense* anders justiert ist als bei anderen Bäumen. Es ist zwar davon auszugehen, dass physiologische Abhängigkeiten nicht linear verlaufen, sondern eher dem Bild eines "*punctuated equilibrium*" entsprechen (GOULD & ELDREDGE 1977), dass also Wechselwirkungen möglichst lange einer spezifischen Proportion folgen, bevor sie sich relativ rasch und drastisch in Richtung eines neuen Stabilitätsniveaus ändern (vergleiche Abb. 2-7, Seite 23). Trotzdem ist es wichtig, die genannten physiologischen Daten als Zeitreihe und nicht nur als Augenblicksaufnahmen analysieren zu können, um mögliche Verschiebungen in den Wirkungsgefügen zu erkennen.

Auf Erklärungsmöglichkeiten für den scheinbaren Widerspruch zwischen erhöhten Wachstumsraten und visuell abnehmender Kronenvitalität ist in Abschnitt 2.2.5 ab Seite 28 bereits eingegangen worden. Das Dilemma, mit der beobachteten Größe (Radialzuwachs auf Brusthöhe) womöglich nicht adäquat das physiologische Leistungs- beziehungsweise Reaktionsvermögen erfassen zu können, soll noch einmal gesondert diskutiert werden. Der Zusammenhang kann zum einen verwischt werden durch die Komplexität der biochemischen Abläufe, die eventuell auch dann noch für unauffällige Jahrringbreiten sorgen, wenn die Elastizität des Baumes bereits überschritten ist und im Stressmodell (Abb. 2-5, Seite 19) die Erschöpfungsphase begonnen hat. Zum anderen können unterschiedliche Frequenzen sowie Phasenverschiebungen bei Zuwachs und physiologischer Stressreaktion zu unzutreffenden Schlussfolgerungen führen (ELLING & DITTMAR 2003). So könnte zum Beispiel erklärt werden, weshalb in Eichenbeständen immer wieder auch Bäume absterben, die bis dahin weder durch zurückbleibenden Radialzuwachs noch durch besonders kleine, eingeklemmte Kronen auffällig waren.

Die Zuwachssteigerungen der jüngeren Vergangenheit in vielen Gebieten Europas und Nordamerikas belegen zwar eine höhere Leistungsfähigkeit vieler Waldstandorte (KARJALAINEN et al. 1999; BOISVENUE & RUNNING 2006; MCMAHON et al. 2010). Sie vergrößern aber auch das Risiko von Störungen: Größere Baumhöhen steigern zum Beispiel die Anfälligkeit für Bruch- und Wurfschäden bei Stürmen, höhere Bestandesdichten vergrößern die Belastungen für den Einzelbaum in Dürreperioden und erhöhen das Waldbrandrisiko (SPIECKER 1999; OSTRY et al. 2011). Auch vor diesem Hintergrund ist es nicht ratsam, das Wuchsverhalten der jüngeren Vergangenheit ohne Einschränkungen in die Zukunft zu prolongieren. Dazu sind die Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Systemebenen von der Zelle bis zur Population und ihren Umweltbedingungen zu komplex und die lokalen Verhältnisse zu einflussreich (LINDNER et al. 2005; MATYSSEK et al. 2010).

Für die vergangenen Jahre werden regional hohe Belastungen vieler Eichenbestände vor allem durch phytophage Insekten und Witterungsextreme wie Trockenperioden im Frühling beschrieben (NW-FVA 2011; BRESSEM & STEEN 2012; MÖLLER & SCHULZ 2012). Davon sind aber in der Regel nicht alle Flächen gleichmäßig betroffen. Die Beobachtung des Kronenzustands auf den deutschen Kernflächen seit Untersuchungsbeginn hat gezeigt, dass viele Bäume sich nach dem von starken Schäden geprägten Jahr 2006 deutlich erholt haben. Vor allem hinsichtlich der Kronenstruktur ist das nur im Verlauf über mehrere Jahre hinweg erkennbar; die Gründe liegen in den durch die Methode angesprochenen Parametern, die sich nur langsam verändern. Das gilt für die Mittelwerte auf Bestandesebene; für Einzelbäume sind auch interannuelle Sprünge um mehrere Stufen zum Beispiel durch plötzliche Mortalität möglich. Dass der häufigen Ansprache mit der Stufe 6 über Jahre hinweg nur in wenigen Fällen eine weitere Verschlechterung, oft aber eine Verbesserung folgte, widerspricht den eigenen Erwartungen zu Beginn der Untersuchungen von einem "*point of no return*", der mit Erreichen der Stufe 6 überschritten sei. Selbst Bäume der Stufe sieben (Grobast-Stadium kurz vor dem endgültigen Kronenzerfall) haben sich über die Jahre hinweg zum Teil deutlich erholt (Abb. 5-95).

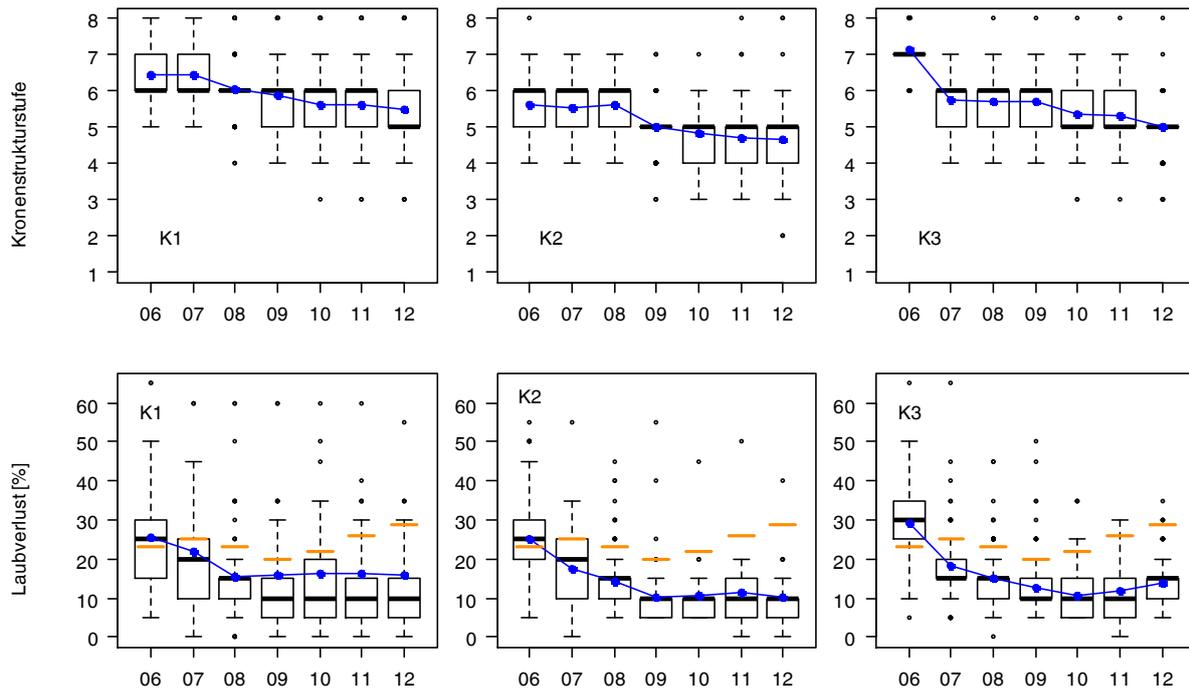


Abb. 5-95: Entwicklung der Kronenstrukturstufen (oben) und des prozentualen Laubverlusts auf den deutschen Kernflächen in den Jahren 2006-2012 (Bezug: Januar beziehungsweise August). Neben den Medianen in den Boxplots sind die arithmetischen Mittel in blau dargestellt. Stichprobenumfang K1: $n = 110$, K2: $n = 124$, K3: $n = 177$ (Differenzen zu Tab. 4-8 auf Seite 101 ergeben sich daraus, dass hier nur Bäume einbezogen sind, die bis zum Ende nicht abgestorben waren). Als waagerechte orangefarbene Linien sind die Werte der Waldzustandserhebungen für den prozentualen Laubverlust in Brandenburg angegeben (MIL 2013).

Die Mittelwerte des sommerlichen Laubverlusts auf den deutschen Kernflächen liegen nach Abb. 5-95 in den letzten Jahren etwas niedriger als die Angaben für die Artgruppe "Eiche" der Waldzustandsberichte für Brandenburg. Die Differenzen können zum Teil aus dem Subjektivitätsanteil der gutachtlichen Einschätzung resultieren, zum Teil sind sie Folge der willkürlichen Auswahl der Versuchsflächen, die sich in standörtlichen Gegebenheiten von den Referenzbeständen der Waldzustandserhebung unterscheiden. Meiner Ansicht nach belegen sie aber auch die Vorteile von Mischbeständen. Die Bäume gerade auf K2 und K1 konnten durch die relativ geringe Bestandesdichte vergleichsweise große, widerstandsfähige Kronen aufbauen, die sich schnell erholten. Außerdem sind nach ALTENKIRCH et al. (2002) die Lebensbedingungen für Schädlingsantagonisten in den strukturreichen Mischbeständen besser als in Reinbeständen.

Da sich der größte Teil der Eichenkronen trotz der sichtbaren Erholung des Kronenzustands noch im Bereich zwischen den Kronenstrukturstufen 4 ("Segment-Stadium") und 6 ("Grobast-Stadium") bewegt, gibt es keinen Grund zur Entwarnung. Dies gilt auch deshalb, weil laut aktuellem Waldzustandsbericht für Brandenburg die Kronenverlichtung an Trauben-Eichen seit 2009 stärker ist als an Stiel-Eichen und einen weiter ansteigenden Trend zeigt, obwohl die Werte bei Stiel-Eiche zurückgehen. Für 2012 liegen die mittleren Laubverluste bei 33 Prozent für Trauben- und bei 21 Prozent für Stiel-Eiche (MIL 2013).

5.2.2 Beziehungen zwischen Witterung und Wuchsverhalten

Die am stärksten verallgemeinernde beziehungsweise verdichtende Methode zur Untersuchung von Witterungs-Zuwachs-Beziehungen ist die Weiserjahanalyse. Ihre Ergebnisse sind abhängig von der angewandten Methodik. Das hier gewählte Verfahren zur Identifikation von Weiserjahren wird insofern als Schritt in die richtige Richtung gewertet, als es unabhängig von gutachtlich festzulegenden Schwellenwerten die Häufigkeitsverteilung der Jahrringindex-Werte als Grundlage nutzt und damit biologisch und statistisch plausibel ist (Abb. 3-25, Seite 83). Es bleibt allerdings abhängig vom gewählten Ansatz zur Herleitung der Jahrringindex-Zeitreihen, seine Ergebnisse sind demnach nur bei Nutzung des in 3.3.3 beschriebenen methodischen Weges reproduzierbar. Um zu prüfen, inwieweit die so identifizierten Weiserjahre den Aussagen "klassischer" Modelle auf Basis von Schwellenwerten ähnlich sind, wurden beide Verfahren auf die Stichproben des herrschenden Bestandes auf drei Kernflächen angewandt (Abb. 5-96). Dem "threshold"-Modell liegen in diesem Fall Schwellenwerte von mindestens 10 % Zuwachsdifferenz zum Vorjahr sowie ein Mindestanteil von 80 % betroffenen Bäumen zu Grunde (BIJAK 2008; SCHRÖDER 2008).

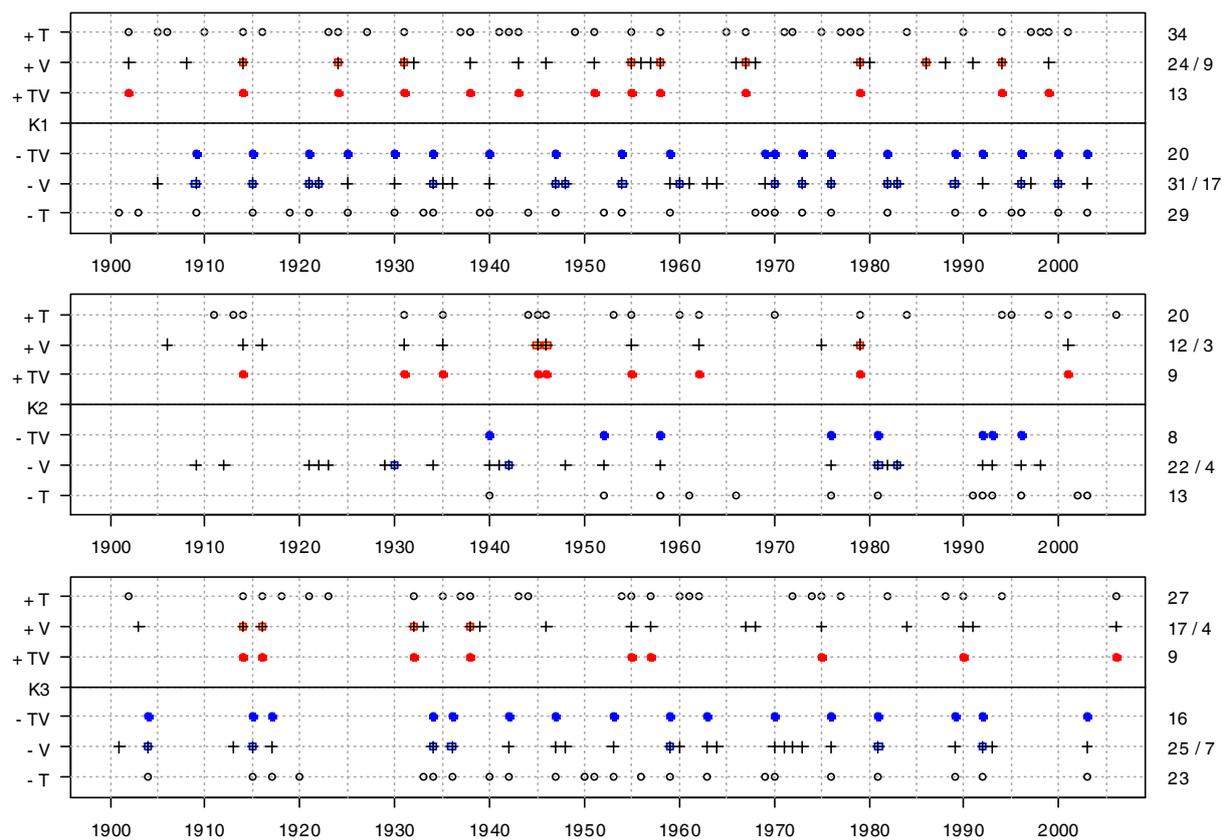


Abb. 5-96: Vergleich von Methoden zur Identifikation von Weiserjahren (WJ) anhand der drei deutschen Kernflächen K1, K2 und K3 (von oben nach unten; siehe Tab. 3-1). Dargestellt sind die WJ nach der "threshold"-Methode (T) mit 10 % Zuwachsabweichung zum Vorjahr (T) und nach der Verteilungs-Methode (V), wie sie in dieser Arbeit benutzt wurde. Darin sind einfache (positive [+]) oder negative [-] WJ als Kreuze dargestellt, extrem negative als blaue Quadrate, extrem positive als orangefarbene Quadrate. Rote Punkte markieren Jahre, die nach beiden Methoden als positive Weiserjahre identifiziert wurden, blaue Punkte zeigen durch beide Methoden bestimmte negative WJ. Rechts neben den Wertereihen ist die Anzahl der entsprechenden WJ angegeben, im Fall der Verteilungsmethode zuerst die einfachen, dann nach Schrägstrich die extremen WJ.

Im Vergleich zu den einfachen Weiserjahren nach dem Verteilungsansatz zeigt Abb. 5-96 für die *threshold*-Methode auf K1 bis K3 deutlich mehr positive, aber weniger negative Weiserjahre an. Das kann daran liegen, dass die Probebäume auf "gute Jahre" uneinheitlicher reagiert haben als auf schlechte Wachstumsbedingungen. Die *threshold*-Methode mit ihrer Schwelle von 80 Prozent betroffener Bäume ist gegenüber dieser höheren Variation überdurchschnittlicher Jahrringindex-Werte unempfindlicher als die Verteilungsmethode. Es fällt weiterhin auf, dass sich die beiden Methoden bei weitem nicht für alle Jahre parallel verhalten. Auf K1 zum Beispiel liegt nur für weniger als die Hälfte der durch die *threshold*-Methode identifizierten positiven Weiserjahre auch eine entsprechende Kennzeichnung nach dem Verteilungsansatz vor, umgekehrt sind nur etwas mehr als 50 Prozent von dessen Weiserjahren auch vom *threshold*-Modell erfasst worden. Extreme Weiserjahre hingegen – und hier vor allem die positiven – werden in fast allen Fällen von beiden Modellen erkannt. Hinsichtlich der Weiserjahreanzahl ergeben sowohl Verteilungs- als auch *threshold*-Methode die gleiche Rangfolge $K1 > K3 > K2$. Eine weitere Anwendung der Verteilungsmethode sollte neuere Ansätze wie den Vergleich des mittleren Jahrringindex eines Jahres mit den Werten der Vorjahre berücksichtigen, um auf die "Trägheit" der Wuchsreaktion beziehungsweise autokorrelative Restwirkungen eingehen zu können¹.

Betrachtet man die Weiserjahre, die in dieser Arbeit nach dem Verteilungsansatz für die Kern- und Zusatzflächen (vergleiche Abb. 4-61, Seite 126) identifiziert wurden, dann sind die in Tab. 5-19 zusammengeführten Jahre von besonderer Bedeutung. Zusätzlich angegeben sind die Jahre, in denen auf den 14 Zusatzflächen mit mindestens bis 1950 zurückreichenden Zeitreihen die Werte all dieser Chronologien einheitlich ober- oder unterhalb des Mittelwerts 1,0 liegen. Diese Jahre werden als zusätzliche Hinweise auf die standortübergreifende Einheitlichkeit im Zuwachsverhalten verstanden; sie zeigen "Fernkorrelationen" an, die auf Witterungseinflüsse als zentrale, externe Steuerungsgröße schließen lassen (ROLLAND 2002).

Tab. 5-19: Gemeinsame Weiserjahre nach der Verteilungs-Methode für die deutschen Kernflächen (n = 0) und alle Zusatzflächen, deren Chronologien vor 1950 beginnen (n = 14)

Weiserjahre	K1+K3	K1+K2+K3	ZF*	ZF2 [§]
negativ	1915, 1934 , 1936, 1947, 1948, 1959, 1960, 1963, 1964, 1970 , 1973, 1976, 1989, 1992 , 2003	1934 , 1948, 1976, 1992	1954, 1970 , 1992	1930, 1934 , 1940, 1954, 1970 , 1978, 1989 , 1992
positiv	1914, 1932 , 1938, 1946, 1955, 1957, 1967, 1968, 1991	1914, 1946, 1955	1932 , 1975	1932 , 1938, 1939, 1945, 1949, 1966, 1979, 2001
extrem neg.	1915, 1934	-	-	-
extrem pos.	1914	-	-	-

¹ BECK (persönliche Mitteilung 2012). Die AR(1)-Modellierung im Zuge der Jahrringindex-Bildung (vergleiche 3.3.1, Seite 72) soll die Autokorrelation ersten Grades zwar beseitigen, trotzdem ergeben sich hin und wieder auch danach noch signifikante Beziehungen zwischen den JRI-Werten von aktuellem und Vorjahr.

* Als Zusatzflächen-Weiserjahr gelten die Jahre, in denen bei mindestens 85 Prozent der Flächen einheitlich ein Standort-Weiserjahr nach dem Verteilungsansatz vorliegt.

[§] Hier sind die Jahre seit 1930 angegeben, in denen die Werte aller berücksichtigten Zusatzflächenchronologien über (positives WJ) oder unter 1 (negatives WJ) liegen.

Unter den als Weiserjahr (WJ) ausgewiesenen Jahren finden sich nur sehr wenige, die über viele Flächen hinweg auffällig waren. Der Extremsommer 2003 war weder im selben Jahr einheitlich wirksam (nur auf knapp 60 Prozent der Zusatzflächen sowie auf K1 und K3 trat ein negatives WJ auf) noch im Jahr darauf – 2004 zeigten nur rund ein Drittel der ZF ein negatives WJ. Neben der geringen Zahl standortübergreifender "einfacher" WJ fällt auf, dass sich weder auf den drei deutschen Kernflächen noch auf den Zusatzflächen gemeinsame extreme WJ finden lassen (extreme WJ liegen dann vor, wenn die Jahrringindizes aller Bäume im betreffenden Jahr einheitlich einen Wert größer oder kleiner als eins haben). Diese geringe Einheitlichkeit ist mit Blick auf die Elastizität und Resilienz der Eichenpopulationen positiv zu bewerten, zeigt sie doch, dass es immer wieder Bäume gibt, die anders als die Mehrheit reagieren. Auf die im Vergleich mit anderen Baumarten schwache Reaktion der Eiche auf den Witterungsverlauf auch in Extremjahren haben unter anderem BECK (2010) und ZANG et al. (2011) hingewiesen. Die relativ geringe Wirkung der extremen Trockenperiode 2003 auf die Jahrringbreiten von Eichen 2003 und 2004 wird auch in Untersuchungen von NEUWIRTH et al. (2007b) sowie WERF et al. (2007) für Westdeutschland und die Niederlande belegt. Andere Jahre wie 1947, 1976 und 1996 waren nach ihren Studien wesentlich deutlichere WJ. BECK (2010) wies auf den deutschen Dauerbeobachtungsflächen des Level-II-Programms der EU die WJ 1946 und 2001 (positiv) sowie 1956 und 1976 (negativ) auf allen elf untersuchten Eichen-Plots nach. Diese Jahre tauchen in der Tab. 5-19 zwar auf, aber nie einheitlich für Kern- und Zusatzflächen.

Einer der Gründe für die relativ hohe Divergenz der Versuchsflächen in Bezug auf die Weiserjahre ist sicherlich ihre genetische Unterschiedlichkeit. Im Projekt "OakChain" sind die Eichenpopulationen der Kernflächen anhand ihrer Chloroplasten-DNA hinsichtlich ihrer Herkunft aus den glazialen Rückzugsgebieten genetisch charakterisiert worden. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Bäume auf K1 mehrheitlich aus dem Refugialgebiet im Apennin und auf Sizilien stammen, während auf K2 ein homogener Balkan-Typ dominiert (PETIT et al. 2002; SCHRÖDER et al. 2009a). K3 wird durch eine Mischung zweier Balkantypen mit Beteiligung des iberischen Glazialrefugiums geprägt, K4 durch einen zweiten Balkantypen zusammen mit Apennin-Abkömmlingen, K5 besteht komplett aus einem dritten Balkantypen. Zusätzliche Analysen auf Basis von Isoenzymen belegten die hohe genetische Vielfalt innerhalb der Populationen und bestätigten die genetischen Strukturunterschiede zwischen den Beständen. Danach grenzen sich K1 einerseits und K5 andererseits deutlich von den anderen Flächen ab, K3 und K4 sind sich am ähnlichsten. Der höchste Heterozygotiegrad (23,6 %) liegt auf K2 vor, der niedrigste auf K4 (18,7 %; SCHRÖDER et al. 2009a). Dies korrespondiert auffällig mit der für K2 nachgewiesenen geringen Interkorrelation der Einzelbaum-Jahrringbreitenzeitreihen, der niedrigen Gleichläufigkeit (Tab. 4-15) und dem ver-

gleichsweise niedrigen Niveau der Witterungs-Zuwachs-Kopplung auf dieser Fläche (siehe zum Beispiel Abb. 4-57 und Tab. 4-14 auf Seite 122). Ein weiterer Grund für das Fehlen von Weiserjahren, die sich in allen untersuchten Kollektiven gleichzeitig abbilden würden, wird in der Mischung der Versuchsbestände mit der Baumart Kiefer vermutet. Die daraus im Vergleich zu Reinbeständen resultierende größere Vielfalt an Wuchsbedingungen führt zu einer größeren Spannweite individueller Reaktionsmuster. Nur in seltenen Fällen sind die Witterungswirkungen so drastisch und einheitlich, dass ein WJ festzustellen wäre.

Die Frage zeitlicher Trends in der Einheitlichkeit des Zuwachsverhaltens, wie sie in Weiserjahren zum Ausdruck kommt, für den Untersuchungszeitraum 1900-2006 soll anhand des *Intervalltrends* diskutiert werden (GRIESER 1997; siehe Formel 3-7 und Formel 3-8). Im Unterschied zur Gleichläufigkeit, die vor allem als Mittelwert über längere Perioden hinweg analysiert wird, erfasst der Intervalltrend die Parallelität der Zuwachsveränderung auf Einzeljahresebene. Der Maximalwert 1 entsteht, wenn alle Stichprobenelemente eine positive Differenz zwischen dem Jahrringindex des aktuellen und dem JRI des Vorjahres (also eine JRI-Zunahme) aufweisen, der Minimalwert 0 zeigt eine einheitliche JRI-Abnahme an. Für die Kernflächen sind die Zeitreihen des mittleren Intervalltrends t_i über die Stichprobensäure berechnet worden. In Abb. 5-97 sind nun die prozentualen Anteile der Jahre mit einheitlichen Zuwachsänderungen ($t_i = 1$ oder $t_i = 0$) für die erste, die mittlere und die letzte 50-Jahres-Periode des Untersuchungszeitraums dargestellt.

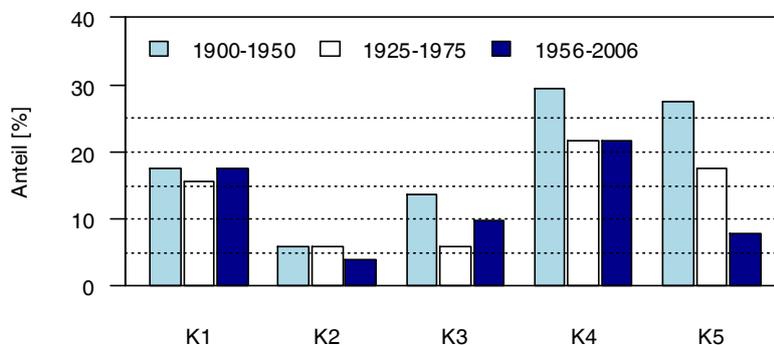


Abb. 5-97: Prozentualer Anteil der Jahre mit gleichgerichteten Änderungen des Jahrringindex bei allen Bäumen der Stichproben im herrschenden Bestand der Kernflächen, identifiziert anhand des Intervalltrends, für verschiedene Zeiträume innerhalb des Untersuchungszeitraums 1900-2006

Im Vergleich der Kernflächen bestätigt sich der bereits mehrfach sichtbar gewordene geringe Grad der Einheitlichkeit im Zuwachsverhalten auf K2. Über den Betrachtungszeitraum hinweg traten nur in etwa fünf Prozent der Jahre völlig homogene Zuwachsänderungen bei den dort untersuchten Bäumen des herrschenden Bestandes auf. Auf K1 betrug der Anteil von Jahren mit extremen Intervalltrends in allen Perioden zwischen 15 und 17 Prozent, auf K3 zwischen 10 und 14 Prozent. Die polnischen Flächen, vor allem K4, zeigen eine deutlich größere Parallelität, die in der ersten Hälfte des letzten Jahrhunderts stärker war als in den vergangenen 50 Jahren. Die größere Einheitlichkeit zu Beginn der Betrachtungsperiode kennzeichnet mehr oder weniger alle Flächen. Eine mögliche Erklärung dafür könnte die

"Ausdifferenzierung" der Bäume mit steigendem Alter sein: Über die Jahrzehnte haben sich die phänotypischen Unterschiede zwischen den Individuen, zum Beispiel hinsichtlich ihrer Kronengestalt, sowie die Vielfalt räumlicher Wuchskonstellationen immer weiter vergrößert. Dies hat schließlich zu einer abnehmenden relativen Bedeutung des Witterungssignals für Zuwachsveränderungen geführt¹.

Die Beziehungen zwischen Witterung und Zuwachs sind auch nach den Ergebnissen anderer Studien "temporalen drifts" unterworfen, unter anderem von KAHLE (1994) für Fichten im Südschwarzwald und von SCHRÖDER (2009b) für Eichen in Nordostdeutschland. CARRER (2011) hat für Lärchen und Zirbelkiefern festgestellt, dass sich auch innerhalb von Populationen die Rangfolgen zwischen den Einzelbäumen hinsichtlich der Reaktionsstärke auf Witterungseinflüsse mit der Zeit verändern können. Außerdem zeigt er, dass die Bäume eines Bestandes auf unterschiedliche innerjährliche Zeiträume reagieren: Neben Individuen mit der höchsten Korrelation zwischen Sommertemperaturen und Jahrringindex gibt es andere, deren JRI am deutlichsten auf die Herbsttemperaturen reagiert hat. Eine deutlich zunehmende Sensitivität (als Reaktion auf äußere Einflüsse), verbunden mit zurückgehenden Jahrringbreiten, hat BECK (2009) für Buchen auf Dauerbeobachtungsflächen des Level-II-Netzes nachgewiesen. Einzelne oder mehrere aufeinanderfolgende Extremjahre können nach seinen Erkenntnissen "Trendbrüche" auslösen, nach denen die Bäume oft über längere Zeit veränderte Zuwachsniveaus zeigen.

Die von SCHARNWEBER et al. (2011) wie von BECK (2009) beobachtete Zunahme der Sensitivität bei abnehmender Autokorrelation in so gut wie allen untersuchten Buchenbeständen war für die hier einbezogenen Trauben-Eichen nicht gegeben (siehe Abb. 4-53 und Abb. 4-54, Seite 119). Die Gegenüberstellung der Zeitreihen-Parameter Autokorrelation und Sensitivität für Kern- und Zusatzflächen in den Abbildungen belegt zwar unterschiedliche Werte gerade der AK1 für die Zeit bis 1980 und für die Periode 1981-2006. Die Differenzen sind jedoch nur in Ausnahmefällen statistisch signifikant und vor dem Hintergrund relativ starker Schwankungen dieser Größe im gesamten Untersuchungszeitraum zu sehen. Die einzelnen Flächen verhalten sich zudem sehr unterschiedlich. Auffällig ist das "antizyklische" Verhalten der Eichen auf der östlichsten Kernfläche K5, wo die Autokorrelation in den letzten Jahrzehnten deutlich zugenommen hat. In Verbindung mit der im Vergleich der beiden Perioden mehr oder weniger gleichbleibenden Sensitivität bedeutet die durchschnittlich abnehmende Autokorrelation, dass der Einfluss externer Faktoren auf die Jahrringbreite zwar zugenommen hat, die Reaktionen der Bäume jedoch in einem ungefähr konstanten Rahmen ablaufen.

Im Vergleich der Kernflächen fallen unter anderem die Unterschiede in der Stärke der autokorrelativen Beziehungen zwischen der aktuellen Jahrringbreite und den Werten vergangener Jahre auf. Vor allem für die Eichen auf K2 liegen weit in die Vergangenheit reichende signifikante Korrelationskoeffizienten vor. Einschränkend ist jedoch zu sagen, dass diese

¹ Die Bedeutung individueller Unterschiede für bestandesbezogene Aussagen zur Reaktion auf Witterungseinflüsse diskutiert zum Beispiel CARRER (2011) sehr umfassend.

langen "lags" mit signifikanter Autokorrelation auch durch die Pufferung der Jahre innerhalb dieses Zeitraums erzeugt werden. Die Berechnung der "partiellen Autokorrelation", bei der die Wirkung aller vorhergehenden Autokorrelationen rechnerisch ausgeschaltet wird (CRAWLEY 2007), zeigt deutlich niedrigere Koeffizienten für die Korrelation mit länger zurück liegenden Jahren an. Am Beispiel des herrschenden Bestandes von K2 ist dies in Abb. 5-98 dargestellt. Danach sind nur die Korrelationen mit dem direkt vorhergehenden Jahr sowie mit den Werten von vor vier Jahren (Lag = 1 und Lag = 4) für sich allein statistisch signifikant. Auf diese Weise relativiert sich die weit zurückreichende Stärke der "einfachen" Korrelationen (AK1) zwar etwas. Dennoch harmonisiert die an diesem Parameter sichtbare Sonderrolle der K2 mit der auch durch andere untersuchte Charakteristika (zum Beispiel die geringe Gleichläufigkeit, siehe Tab. 4-15, Seite 123) belegten höheren Stabilität dieses Bestandes gerade im Vergleich mit den anderen deutschen Kernflächen.

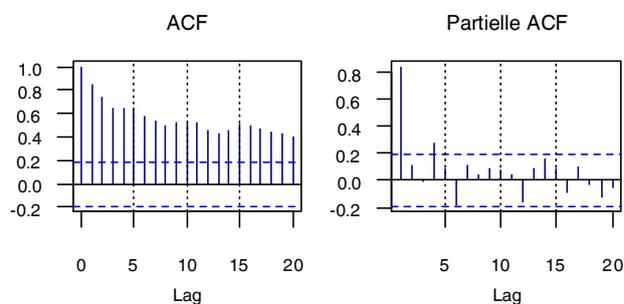


Abb. 5-98: Autokorrelation erster Ordnung ("ACF"; links) und partielle Autokorrelation der einzelnen Jahre (rechts) für die Jahrringbreiten-Zeitreihe des herrschenden Bestandes von K2. Zusätzlich sind die Signifikanzgrenzen der Beziehung als gestrichelte blaue Linien dargestellt.

Die Auswertung der Autokorrelations- (AK1) und Sensitivitätswerte in den Jahrringbreiten-Zeitreihen der Zusatzflächen zeigte keinerlei Abhängigkeiten vom Alter der untersuchten Bestände. Vergleichsweise junge Populationen konnten ebenso hohe AK1-Niveaus aufweisen wie sehr alte und umgekehrt: Die Fläche 5192 in Schwenow mit einem Alter von etwa 60 Jahren liegt mit $AK1 = 0,48$ auf gleicher Ebene wie die fast doppelt so alte Population in Dubrow 3421, während sowohl der über 120-jährige Bestand in Fünfeichen 56 als auch die knapp achtzigjährigen Bäume in der Nachbarabteilung FE57 Werte von etwa 0,32 zeigen.

Wenn man alle in dieser Arbeit angewandten Auswertungen zusammenfasst, hat sich die Wirkungsstärke der Witterung auf den Zuwachs seit Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts bei allen Schwankungen und flächenbezogenen Differenzen nicht trendhaft verändert. Bestätigt wird das unter anderem von FRIEDRICHS et al. (2009), die keine Zu- oder Abnahme der Sensitivität in den Jahrringzeitreihen für Trauben-Eichen in Westdeutschland fanden¹. Die Stabilität der Zusammenhänge für die untersuchten Eichen suggeriert eine gute Extrapolierbarkeit der gefundenen Witterungs-Zuwachs-Beziehungen ohne größere Einschränkungen. Dies mag auf der räumlichen Ebene für vergleichbare Standorte zutreffen. Auf der zeitlichen Ebene muss jedoch (wie schon mehrfach betont) auf die Unwägbarkeiten

¹ "The progressive warming in both regions from the early twentieth century to the present ..., however, did not lead to a common increase in tree-growth sensitivity to drought. The number of months with significant growth-drought correlations of *Q. petraea* ... did not increase over time." (FRIEDRICHS et al. 2009)

in den komplexen Beziehungen zwischen physiologischen Abläufen, mannigfaltigen Umwelteinflüssen und Anpassungsvermögen der Bäume hingewiesen werden (siehe unten).

Hinsichtlich ihrer Kronenvitalität belegt die relativ geringe Mortalität im Untersuchungszeitraum (nach den für die Bäume belastenden Sommern 2003 und 2006) zusammen mit der durchschnittlichen Verbesserung des Kronenzustands in den betrachteten Mischbeständen die Fähigkeiten der Trauben-Eiche zur Revitalisierung. Wie die Differenzen zwischen den Kernflächen in verschiedenen Zeitreihen-Parametern und in der Reaktion auf Witterungseinflüsse zeigen, sind Vitalität und Anpassungsfähigkeit regional offenbar unterschiedlich stark ausgeprägt. Flächen mit einer angespannteren klimatischen Wasserbilanz (kWb) wie K1 und K3 zeigen zum Beispiel mehr Weiserjahre und eine einheitlichere, mit der Zeit zunehmende Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen als K2 und K5 mit weniger negativer kWb. Diese Relationen bestätigen zusammen mit den dendroklimatologischen Ergebnissen die vielfältigen Hinweise anderer Untersuchungen zur dominierenden Bedeutung der Wasserverfügbarkeit für das Wachstum und die Vitalität der Trauben-Eiche im Untersuchungsgebiet.

Hinweise auf zeitliche Veränderungen im Witterungs-Zuwachs-Komplex gibt die Modellierung zukünftiger Jahrringindexwerte (JRI) durch CLIMTREG auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume. Das Mittel der JRI ist für die meisten hier untersuchten Flächen höher, wenn zur Modellierung statt des gesamten möglichen gemeinsamen Wertezitraums (CIN) nur seine zweite Hälfte verwendet wird. Eine mögliche Erklärung dafür besteht darin, dass in den Reaktionen der Bäume auf Witterungseinflüsse Anpassungsprozesse abgelaufen sind. Sie haben sich offensichtlich auf die im Verlauf des CIN zunehmenden Temperaturen (und die damit einhergehenden größeren Trockenheitsbelastungen) eingestellt und konnten ihr Wachstum aufrecht erhalten (siehe 4.3.1, Seite 131). Die Extrapolation dieser adaptiven Entwicklung in die zukünftigen Bedingungen nach den Klimaszenarien mit weiter steigenden Temperaturen und abnehmender Wasserverfügbarkeit in der Vegetationsperiode bedeutete, dass die betreffenden Individuen mit diesen Bedingungen umzugehen lernen. Statistisch lässt sich ein solches Systemverhalten zwar modellieren, dies ist aber mit einer Reihe von Unsicherheiten verbunden: Offen bleiben muss zum Beispiel die Frage nach eventuellen "*tipping points*" in dieser Entwicklung, an denen die Belastungen durch Witterungsextreme die Anpassungsfähigkeit zu vieler Bäume überschreiten und verstärkte Mortalität auftritt (BLATT et al. 2010). Auch die Kombination der Witterungsbelastungen mit anderen Faktoren wie Insektengradationen bleibt im Modell unberücksichtigt.

Die zwei Ausnahmen hinsichtlich der beobachteten Anpassungsprozesse sind die westlichste Kernfläche K1 und die Zusatzfläche FE56 in Ostbrandenburg. Dort sind eine bessere Entwicklung im Szenariozeitraum für das Modell auf Basis der ersten Hälfte des CIN (K1) beziehungsweise keine Verbesserung des Modellverhaltens durch Kalibrierung mit der zweiten Hälfte des CIN (FE56) festzustellen (siehe Anhang 8.16). Eine mögliche Erklärung ist, dass die Bäume bereits seit einigen Jahrzehnten eine so intensive Trockenheitsbelastung erfahren haben, dass ihnen Anpassungsleistungen nicht (mehr) möglich sind. Stattdessen

haben sie schon in der jüngeren Vergangenheit offenbar deutlicher als auf den anderen Flächen unter der sich immer weiter öffnenden Schere zwischen gleichbleibenden Niederschlägen und steigenden Temperaturen gelitten. Es ist deshalb eher fraglich, ob die betroffenen Bestände in der Lage sind, mit den sich ändernden Witterungsbedingungen Schritt zu halten. Das Verhalten des beherrschten Bestands auf K1, der die beschriebenen Zusammenhänge in den mittleren JRI-Werten des Szenariozeitraums noch stärker widerspiegelt, deutet auf noch größere Probleme in diesem Kollektiv beim Umgang mit Trockenheit und hohen Temperaturen und eine noch deutlichere Erschöpfung hin (vergleiche die Ausführungen zu Stress und seinen Folgen im Abschnitt 2.2.1, Seite 17).

Wie zum Teil schon beschrieben, setzt die Extrapolation der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen die Annahme voraus, dass die zugrundeliegenden physiologischen und dendroklimatologischen Zusammenhänge auch in Zukunft gültig bleiben (siehe die Erläuterungen zur Abb. 4-84, Seite 151). Auf Grund der inhärenten Dynamik in der Entwicklung des Klimas, der möglichen Rückkopplungen zwischen einzelnen Einflussgrößen und der Anpassungs- beziehungsweise Trainingsprozesse in den Populationen werden sich diese Zusammenhänge aber immer wieder verändern. Der Umgang mit einer solchen Dynamik wird bestimmt von Fragen des zeitlichen und räumlichen Maßstabs, das heißt von dem angestrebten Bezugsrahmen. Wichtig ist dann, in welchem Ausmaß (in Bezug auf die Ziel-Skala) die Veränderungen stattfinden – ob sich zum Beispiel die Richtung festgestellter Korrelationen ändern kann – und wie man sie in Schätzmodelle integriert. Das folgende Beispiel soll diese Problematik verdeutlichen.

Ein für dendroklimatologische Modelle bedeutsames Phänomen ist das sogenannte "Divergenzproblem". Es besteht darin, dass die Korrelationen zwischen Jahrringbreite (und besonders der maximalen Spätholzdichte) sowie der Temperatur in borealen Nadelwäldern in den vergangenen Jahrzehnten immer geringer geworden sind (BRIFFA et al. 1998; D'ARRIGO et al. 2008). Der Zuwachs steigt dort fast überall nicht mehr so stark, wie es die auf Basis früherer Jahrzehnte erstellten Modelle für die zunehmenden Temperaturen vorhersagen. Dieser auffällige "offset" gilt auch in die andere Richtung: Zwischen den gemessenen Temperaturen und den Werten, die sich aus der dendroklimatischen Extrapolation von Funktionen mit der Jahrringbreite sowie der Spätholzdichte als unabhängiger und der Temperatur als abhängiger Größe ergeben, besteht eine zunehmende Differenz¹. D'ARRIGO et al. (2008) nehmen als eine Ursache an, dass durch die globale Erwärmung für viele bis vor kurzem wärmelimitierte Wälder der nördlichen Hemisphäre die Temperatur nicht mehr der entscheidende Minimumfaktor sei. Die ursprünglich förderliche Wirkung höherer Temperaturen werde vielmehr durch zunehmende Trockenheitsbelastungen abgeschwächt.

Für retrospektive Analysen mit Anwendung von *moving windows*, wie sie im Zentrum dieser Arbeit stehen, ist das Divergenzproblem von untergeordneter Bedeutung. Für dendroklimatologische Herleitungen der Temperaturen vergangener Jahrtausende sowie für das

¹ "Over recent decades, a divergence between cooler reconstructed and warmer instrumental large-scale temperatures is observed." (WILSON et al. 2007)

Abschätzen der möglichen Kohlenstoffbindung in der Zukunft ist es jedoch von zentraler Bedeutung. Zur Verringerung der Divergenz empfehlen WILSON et al. (2007), die zum Erstellen überregionaler Chronologien heranzuziehenden Jahrringzeitreihen sorgfältig und je nach Untersuchungsziel auszuwählen, sowie weitere methodische Anpassungen. Dieses Thema ist hier ausführlicher dargestellt, um noch einmal auf die grundsätzliche Unsicherheit beim Verlagern von Beziehungen, die man für einen bestimmten Zeitraum herausarbeiten konnte, in andere Perioden oder Untersuchungsregionen hinzuweisen. In Bezug auf die vorgelegten Ergebnisse soll damit noch einmal darauf hingewiesen werden, dass alle Aussagen über die mögliche Zukunft nur den Charakter von Szenarien und Schätzungen haben können.

Ein weiteres Problem für die Prognose des künftigen Vitalitäts- und Zuwachsverhaltens sind die engen Interkorrelationen zwischen den zur Modellierung herangezogenen Witterungsparametern (FRITTS 1976; BECK et al. 2013). Die nach Niederschlag und Temperatur getrennten Korrelationsanalysen, wie sie hier mit dem Paket `bootRes` durchgeführt wurden, liefern dadurch keine "reinen", sondern in der Regel komplementäre Informationen: Feuchte Sommermonate sind in der Regel kühler als trockene, deshalb weisen getrennte Korrelationsanalysen eine förderliche Wirkung sowohl niedriger Sommertemperaturen als auch höherer Niederschläge in dieser Zeit aus. In Wirklichkeit ist es vermutlich die Kombination beider Faktoren, die den Jahrringindex überdurchschnittlich ausfallen lässt. Die von solchen Interkorrelationen bereinigten Witterungseinflüsse lassen sich deshalb besser an den *response*-Koeffizienten ablesen, die das Ergebnis einer Orthogonalisierung der Variablen im Zuge der Hauptkomponentenanalyse sind. Wie bereits anhand der Tab. 4-17 auf Seite 145 diskutiert, ist es im betrachteten Kontext vor allem wichtig, Vorstellungen zur Wirksamkeit bestimmter Perioden mit ihren charakteristischen Variablenkombinationen zu erhalten, deswegen wurden hauptsächlich die Korrelationen ausgewertet¹.

Den stärkeren Einfluss auf die Zuwachsrates hat im Vergleich der Witterungsparameter nach den vorgelegten Auswertungen der Niederschlag (siehe Abb. 4-75 und Abb. 4-81). Darin bestätigen sich die von einer Vielzahl von Autoren genannten dominierenden Wirkungen der Wasserverfügbarkeit auf den Zuwachs und die Vitalität der Trauben-Eiche (BONN 1998; FÜHRER et al. 1998; SIWECKI & UFNALSKI 1998; KRAUSE 2012). Die in einigen Arbeiten genannte förderliche Wirkung höherer Temperaturen gerade im Vergleich mit der Stiel-Eiche (KRAHL-URBAN 1959; SCHAPER 1978) äußern sich zum Beispiel in Abb. 4-76 (Seite 141). Dort sind zu Beginn der Untersuchungsperiode 1951-2006 positive Korrelationskoeffizienten zwischen den Wintertemperaturen (Dezember bis Februar) und dem Jahrringindex sichtbar. Mit zunehmender Verlagerung des 28 Jahre langen Bezugsfensters in Richtung Gegenwart schwächen sich diese Beziehungen immer mehr ab, bis sich die Korrelati-

¹ Die stochastischen Beziehungen zwischen Witterungsparametern, aber auch anderen Standortfaktoren sind nicht nur für die Modellierung der Jahrringbreite ein methodisches Problem. Sie erschweren zum Beispiel auch die Herleitung und Parametrisierung von Standort-Leistungs-Modellen, wie sie in fortgeschrittenen Waldwachstumssimulatoren wie SILVA enthalten sind (KAHN 1994; PRETZSCH et al. 2002). Neben den Korrelationen zwischen Temperaturen und Niederschlägen sind auch andere Größen wie Bodenart und Wasserverfügbarkeit voneinander abhängig, gehen aber in die Bildung der Standort-Leistung-Beziehungen einzeln ein.

onskoeffizienten für das Beispiel K3 (Sozialklasse 1+2) kaum noch von Null unterscheiden. Im Fall der Zusatzfläche KS6132 in Südostbrandenburg kehrt sich der Zusammenhang sogar um: Für die Periode 1979-2006 ergeben sich signifikant negative Korrelationen zwischen Jahrringindex und der Mitteltemperatur im Januar. Die Limitierung des Zuwachses durch tiefe Wintertemperaturen, wie sie vor 40-60 Jahren noch bestand, ist durch die seitdem abgelaufene Erwärmung also vernachlässigbar geworden. An derartigen Veränderungen lassen sich gut die Effekte des Witterungswandels seit Mitte des letzten Jahrhunderts beobachten (vergleiche Abb. 5-88). Sie werden zusätzlich relevant dadurch, dass gerade für den Winter die deutlichste Erhöhung der Mitteltemperaturen in der Zukunft vorausgesagt wird (LINKE et al. 2010).

Zur Reaktion verschiedener Baumklassen (im Sinne von Sozialklassen; KRAFT 1884) auf Witterungswirkungen konnte in der Literatur nur eine verhältnismäßig geringe Zahl von Studien gefunden werden. MAYER (1958) verglich herrschende und beherrschte Bäume in Eichenbeständen in Süddeutschland unter anderem in Bezug auf die interannuellen Zuwachsschwankungen. Die mittleren Jahrringbreiten der beiden Kollektive waren in Minimumjahren so gut wie identisch, in Optimaljahren dagegen zeigten sich große Differenzen zu Gunsten des herrschenden Bestandes. Dieser weist nach MAYERS Meinung wegen seiner größeren und reaktionsfähigeren Kronen ein höheres Vermögen zu Ausnutzung förderlicher Umweltbedingungen auf. Ohne Korrelationskoeffizienten oder ähnliches zu berechnen, stellte MAYER (1958) eine deutlichere Übereinstimmung zwischen Zuwachsverlauf und Witterungsentwicklung über die Jahre bei dominanten Bäumen fest. Auch KRAUSE (2012) bestätigt (allerdings bei erst zwanzigjährigen Bäumen) stärkere Reaktionen auf die Witterung bei vorwüchsigen Bäumen hoher Vitalität.

PIUTTI & CESCATTI (1997) haben für Rot-Buche unterschiedliche Reaktionen auf Temperatur- und Niederschlagsschwankungen in Abhängigkeit vom Konkurrenzindex nachgewiesen. Sie stellten positive Korrelationen zwischen einem speziellen Zuwachsindex und Mitteltemperaturen vor allem im Frühjahr für herrschende Bäume fest, während bei Bäumen unter hohem Konkurrenzdruck die Korrelationskoeffizienten signifikant negativ waren. Hohe Konkurrenz verschärft demnach die belastende Wirkung überdurchschnittliche Temperaturen. Als Grund lässt sich vermuten, dass es den zurückbleibenden Buchen nicht so wie dominanten Bäumen möglich war, den größeren Verdunstungsanspruch in solchen Situationen durch entsprechende Wasseraufnahme mit Hilfe eines stark ausgeprägten Wurzelsystems zu kompensieren. Für die hier untersuchten Kernflächen waren derartige gegenläufige Reaktionsmuster zwischen dem Verhalten des herrschenden und dem des beherrschten Bestandes nicht zu beobachten. Die beiden Sozialklassen unterscheiden sich zwar im Niveau der mittleren Jahrringbreiten und in der Zahl der Weiserjahre (siehe 4.3.2), ihre Reaktionen auf externe Einflüsse waren jedoch im Wesentlichen gleichläufig.

Die Zuwachsreaktion auf übermäßig trockene Witterung wird auch vom Standort beeinflusst. ABRAMS et al. (1998) haben eine größere Empfindlichkeit bei einer Reihe nordamerikanischer Laubholzarten auf entweder sehr feuchten oder sehr trockenen Standorten fest-

gestellt, während Bäume bei intermediärer Wasserversorgung auf Trockenheit weniger stark reagieren. Analysen zur Wirkung des Extremsommers 2003 im Schwarzwald haben ergeben, dass auf besser wasserversorgten Standorte in den höheren Lagen der Radialzuwachs der Fichten deutlicher zurück ging als in den tieferen Lagen mit generell höherem Verdunstungsanspruch (KAHLE et al. 2007). Nach den Ergebnissen von FEKEDULEGN et al. (2003) hängt die standortbedingte Zuwachsreaktion auch von den ökologischen Strategien der betrachteten Arten ab: Expansive und auf bestimmte Standorte spezialisierte Baumarten zeigen demnach stärkere und standortsabhängigere Reaktionen auf extreme Witterung als Generalisten mit einer eher konservativen ökologischen Ausrichtung. Bei allen dort untersuchten Arten waren die Jahrring-Indexwerte auf der sonnenexponierten Seite eines Höhenzuges stärker mit dem Niederschlag in der Vegetationsperiode korreliert als auf der sonnenabgewandten Seite.

Die von den hier angewandten methodischen Ansätzen zur Erfassung der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen verwendete zeitliche Auflösung hat eine Reihe von Konsequenzen für die Einschätzung ihrer Ergebnisse. Die Verwendung monatlicher Werte durch `bootRes` bedeutet, dass bei der Modellbildung *alle* Monate in ihrer zeitlichen Abfolge einbezogen werden, ungeachtet ihres tatsächlichen Einflusses auf den Jahrringindex als Zielgröße. Dies führt notwendigerweise zu einem größeren Maß an "Rauschen", das in die erzielbaren Modelle hineingezogen wird. Zusätzliche Probleme entstehen dadurch, dass ganze Monate als Eingangsvariablen verwendet werden. Wenn zum Beispiel die Temperaturen nur in der ersten Hälfte eines Monats signifikant positiv mit dem Jahrringindex korreliert sind, so bilden monatsbezogene Korrelationsrechnungen oder *response-function*-Analysen zwangsläufig schwächere Zusammenhänge ab, weil sie auch die zweite, im Beispiel nicht korrelierte Hälfte berücksichtigen. Das eigentliche "Signal" wird nur abgeschwächt erfasst.

Der tagesbezogene Ansatz von CLIMTREG kann die Zusammenhänge wesentlich deutlicher herausarbeiten. Es scheint zwar vordergründig so, als ob die Aussage "zuwachsrelevant sind die Niederschläge vom 20. Mai bis 21. Juni" weniger "allgemeinverständlich" wäre als "zuwachsrelevant sind die Juniniederschläge". Tatsächlich aber gibt die zweite Version die wahren Zusammenhänge verfälscht beziehungsweise unvollständig wieder. Tagesbezogene Ergebnisse sind auch nicht weniger vergleichbar als monatsbasierte Aussagen. Die Resultate unterschiedlicher Untersuchungen lassen sich in Form von Diagrammen wie in Abb. 4-80 (Seite 147) veranschaulichen.

In Zusammenfassung der gemachten Erfahrungen sind Modelle mit tagesgenauer Auflösung wegen ihres biologisch wesentlich plausibleren und methodisch flexibleren Ansatzes im Vergleich zu monatsbezogenen Modellen eindeutig zu bevorzugen. Die objektivierte, automatische Variablenauswahl in CLIMTREG stellt sicher, dass tatsächlich die zuwachsrelevantesten Zeiträume identifiziert und in die Modellierung eingesteuert werden können. Unabhängig davon sollten Aussagen beider Modellsysteme immer durch die Angabe des zeitlichen, räumlichen und datenmäßigen Bezugs der Analyseergebnisse ergänzt werden, um die begrenzte Gültigkeit der – auch bei Tagesauflösung – nur vereinfacht abgebildeten

Beziehungen zu verdeutlichen. Auf Grund der grundsätzlichen Dynamik im Witterungs-Zuwachs-System sind keine gültigen Aussagen zu begründen, die eine langfristige statische Wirksamkeit fester Zeiträume behaupten.

5.2.3 Schlussfolgerungen für die Zukunft der Trauben-Eiche in Brandenburg

Die dritte und abschließende allgemeine Forschungsfrage richtete sich auf die Zukunftsaussichten der Trauben-Eiche (1.3, Seite 4). In ihre hier folgende Erörterung fließen die wesentlichen Erkenntnisse aus der Diskussion der anderen Forschungsfragen mit ein. Als Rahmen dafür bietet sich das konzeptionelle Gerüst der Vulnerabilitätsanalyse an (siehe 2.2.7, Seite 35), das hier aber relativ frei gehandhabt wird. Das Ziel besteht darin, Faktoren aus den natürlichen wie auch den sozialen und wirtschaftlichen Kategorien von Einflüssen einzubinden, die über die Rolle der Trauben-Eiche im Wald der Zukunft angesichts des klimatischen, aber auch des gesellschaftlichen Wandels mitentscheiden. Das System im Zentrum der Analyse sind die Waldgesellschaften beziehungsweise Waldaufbauformen, wie sie gegenwärtig unter Beteiligung der Trauben-Eiche in Brandenburg existieren. Dieses Spektrum reicht von sehr naturnahen, standortgerechten Wäldern mit Beteiligung anderer Baumarten bis zu forstlichen Bestandeszieltypen wie dem reinen Trauben-Eichen-Typ mit bis zu zehn Prozent Beimischung auf mittleren Standorten der trockenen Klimastufe¹ (LUTHARDT 2006). Je nach räumlicher Struktur, Altersmischung, Standort und Artensammensetzung sind unterschiedliche Grade der Vulnerabilität zu erwarten, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Bei der Einschätzung von Vulnerabilität ist immer zu beachten, dass man es nicht mit exakt quantifizierbaren Größen, sondern mit mindestens semiquantitativen, hochakkumulierenden "Containergrößen" zu tun hat. Als eine der zentralen Variablen ist die Exposition (im Sinne der "Betroffenheit" von den Folgen des Klimawandels; BLATT et al. 2010) vor allem abhängig davon, in welchem Maß sich die Szenarien (siehe 5.2.1) verwirklichen werden. Die voraussichtlich zunehmenden Temperaturen stellen im Zusammenspiel mit einer veränderten Niederschlagsverteilung die Bäume vor neue Herausforderungen (LINKE et al. 2010). Die Anpassungskapazität der Art kann auf keinen Fall abschließend beurteilt werden, auch wenn sich aus den Ergebnissen nach 4.2.4 und 4.3.4 Hinweise auf bereits stattgefundenere Anpassungsreaktionen ableiten lassen. Am ehesten ist noch die Sensitivität quantifizierbar, wenn auch nicht vollständig (vor allem in Extrembereichen nicht) und nur in Bezug auf eine eingeschränkte Anzahl von Einflussfaktoren.

Die Wirkungen der Witterung als variabelster Standortkomponente sind in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich dargestellt worden. Mit Blick auf die Sensitivität gegenüber Klimawandelfolgen sind die gleichbleibende Frequenz und Verbreitung der Weiser-

¹ "Bestandeszieltypen für die Wälder des Landes Brandenburg" – Erlass des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV) vom 08. Juni 2006, verfügbar im Internet unter <http://forst.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.202259.de> (abgerufen am 20.02.2013).

jahre von Interesse, die auf ein erhebliches Puffervermögen in Bezug auf die bereits im Beobachtungszeitraum seit 1951 nachweisbare Temperatursteigerung hinweisen. Ebenso relevant sind jedoch die deutlichen Trends vor allem in der Stärke der Korrelationsbeziehungen zwischen Witterungs-Monatswerten und Jahrringindex-Zeitreihen. Die vorrangige Bedeutung der Niederschläge für das Eichenwachstum, wie sie für das hier untersuchte Material belegt werden konnte, haben HILASVUORI & BERNINGER (2010) für Stiel-Eiche sogar am nördlichen Rand ihres Verbreitungsgebietes nachgewiesen. Die unter anderem von ZANG et al. (2012) bestätigte besondere Bedeutung ausreichenden Regens im Frühsommer könnte wegen der von den Klimaszenarien prognostizierten Verlagerung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr die Sensitivität der Eichenbestände erhöhen. Wesentlich modifiziert wird dieses Risiko jedoch durch Standortfaktoren wie die Bodenart und den Bodentyp, die das Wasserspeichervermögen bestimmen, sowie die waldbauliche Steuerung der Bestandesdichte (WAGNER 2004; siehe unten).

Die durchgeführten Analysen können die Zuwachs-Witterungs-Beziehungen innerhalb "üblicher" Schwankungsbreiten darstellen. Sie geben jedoch keinen Aufschluss über das Verhalten der Bäume hinsichtlich möglicher Belastungsgrenzen, bei deren Überschreiten der Einzelbaum oder ganze Bestände mit hoher Wahrscheinlichkeit absterben. Als Auslöser dafür kommen Witterungsextreme in Frage, wie sie zum Beispiel als Hitzesommer im Jahr 2003 auftraten (SCHÄR et al. 2004; CIAIS et al. 2005). Für die korrekte Beschreibung des Wirkens solcher Extremereignisse "aus Sicht des Baumes" und ihre adäquate Integration in Modelle beziehungsweise Szenarien bestehen nach wie vor eine Reihe von methodischen Problemen, wie sie etwa REYER et al. (2013) zusammengefasst haben. Im hier gegebenen Rahmen fehlt zum einen die Berücksichtigung der physiologischen Ebene, auf der sich letztendlich die Frage der Mortalität entscheidet (HARTMANN 2011; RYAN 2011). Zum zweiten konnten auf Grund fehlender Daten und unzureichender methodischer Voraussetzungen die Wechselwirkungen zwischen der Witterung und anderen Einflussfaktoren auf Wachstum und Vitalität wie Insektenfraß oder Pilzbefall nicht in die Analysen einbezogen werden, die das Absterben als Folge eines komplexen Krankheitsgeschehens nach dem Modell von MANION (1981) wesentlich mitbestimmen (SANCHEZ-SALGUERO et al. 2012). Zur weiteren Betrachtung in zukünftigen Studien gerade auf baumartübergreifender Ebene werden deshalb zum Beispiel dynamische Vegetationsmodelle (MCDOWELL 2011) empfohlen, die versuchen, sowohl die physiologischen Vorgänge bei Trockenstress als auch die komplexen Wirkungen anderer Belastungsfaktoren einzubeziehen.

Die komplexen, sich zum Teil gegenseitig fördernden oder hemmenden Kopplungen der Witterungswirkungen mit anderen Belastungen lassen sich für die Zukunft nur sehr eingeschränkt abschätzen. Ansätze zu entsprechenden Untersuchungsmethoden finden sich zum Beispiel bei WHITEHEAD (2011). Bei der Prognose von Risiken durch biotische Schaderreger ist zu beachten, dass neben der vornehmlich durch Schmetterlinge geprägten Fraßgesellschaft an den Blättern auch in Kambium und Holz lebende Käfer die Vitalität gerade von vorgeschädigten Bäumen entscheidend schwächen können. Ein Beispiel ist der Eichenprachtkäfer *Agilus biguttatus* F., der nach Untersuchungen von MORAAL & HILSZCZANSKI

(2000) sowie ROSKAMS & SIOEN (2000) als relevanter Schädling aktiv zum Absterben geschwächter Eichen beiträgt. Auch MÖLLER et al. (2006) weisen auf Gefahrenpotenziale durch diese Art in Brandenburg hin. Da Eichenprachtkäfer wärmebedürftig sind, könnten sie vom Klimawandel profitieren und in der Zukunft eine größere Rolle spielen (siehe auch BÄUCKER et al. 2010). Dies gilt auch für den Eichen-Prozessionsspinner (*Thaumetopoea processionea* L.), der nach Angaben von MÖLLER & SCHULZ (2012) in Brandenburg seit Jahren auf steigenden Flächengrößen Schäden verursacht (Abb. 5-99).

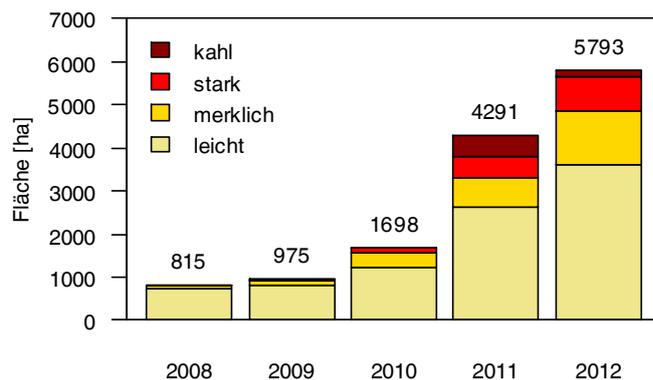


Abb. 5-99: Größe der vom Eichenprozessionsspinner geschädigten Flächen mit Trauben-Eiche im Bundesland Brandenburg seit 2008 (leicht verändert nach MÖLLER & SCHULZ 2012)

Die Zukunftsaussichten für die Trauben-Eiche werden auf der planerischen Ebene auch dadurch beeinflusst, wie die Projektionen zur Vulnerabilität anderer Baumarten (vor allem der Wirtschaftsbaumarten) aussehen. Aus einer Reihe diesbezüglicher Studien gehen die Eichen als am wenigsten sensitiv gegenüber witterungsinduzierten Belastungen hervor (BECK 2010; RÖHLE et al. 2010; ZANG et al. 2011). Das gilt sowohl für Durchschnittswerte wie die mittleren Niederschlagssummen, aber auch für Extremereignisse wie den trockenen und heißen Sommer 2003 (WERF et al. 2007).

Viele Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Vergleich der Witterungssensitivität von Eiche und Buche als den in Mitteleuropa häufigsten Laubbaumarten (BONN 1998; SCHARNWEBER et al. 2011). In der Regel ergibt sich eine höhere Anfälligkeit der Buche gegenüber Trockenheit und hohen Temperaturen (DITTMAR et al. 2003; GEMBALLA & SCHLUTOW 2007; PRETZSCH 2012). Vor dem Hintergrund der mit dem Klimawandel zunehmenden Trockenheitsbelastungen der Wälder wird deshalb für Nordostdeutschland ein zukünftig möglicherweise zunehmender Eichenanteil auf Kosten buchengeprägter Wälder diskutiert (LINDNER et al. 1997; LASCH et al. 2002; RÜFFER & KÄTZEL 2006). SCHARNWEBER et al. (2011) haben für eine Versuchsflächensequenz in Nordostdeutschland zwar eine abnehmende Konkurrenzstärke der Rot-Buche gegenüber der Stiel-Eiche in Richtung zunehmender Kontinentalität festgestellt. Mit BONN (1998) vermuten sie aber, dass sogar ihre eingeschränkte Wuchskraft noch ausreicht, um der Buche unter trockeneren Verhältnissen Konkurrenzvorteile über die Eiche zu sichern. Die Anpassungsfähigkeit und Konkurrenzkraft der Buche wird auch nach BONN (2000), CZAJKOWSKI et al. (2006) und

BOLTE et al. (2007) unterschätzt. Bohrkernanalysen auf zwei Versuchsflächen des INKA-BB-Projekts (GUERICKE et al. 2010) in Mischbeständen aus Rot-Buche und Trauben-Eiche bestätigen dies: In unmittelbarer Nähe der K3, wo im Vergleich der Kernflächen die ungünstigste Wasserverfügbarkeit herrscht, konnte die Buche trotz insgesamt abnehmender Werte einen Vorsprung von 20-40 Prozent in der Jahrringbreite über die vergangenen 50 Jahre behaupten (SCHRÖDER, unveröffentlichter Projektbericht).

Für ähnlich gelagerte Fragen nach der Zukunft bestimmter Bestandestypen sind Kenntnisse über die Beziehungen zwischen Witterung, Zuwachs und Vitalität auf vergleichbarem Niveau für mehrere Arten oder sogar Artengruppen von besonderem Wert. Gerade für die Gattung *Quercus*, die mit mehreren Arten in Mitteleuropa vertreten ist, sollte die Quantifizierung der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen deshalb durch vergleichende Analysen weiterer Arten (neben *Q. petraea*) ergänzt werden. LEBLANC & TERELL (2011) haben beispielhaft zwei eng verwandte nordamerikanische Eichenarten untersucht und festgestellt, dass die Abhängigkeiten von Witterungsgrößen bei beiden Arten nahezu identisch sind. In den Trockentälern der Schweiz wird seit Jahren intensiv das Verhalten der Flaum-Eiche (*Q. pubescens* WILLD.) in der Mischung mit Wald-Kiefer gegenüber zunehmender Trockenheit beobachtet (EILMANN et al. 2006). Die Eiche hat sich dort als trockentoleranter erwiesen als die Kiefer, deren Flächenanteil als Folge steigender Belastungen durch Hitze und negative Wasserbilanzen sinkt (RIGLING et al. 2006).

Mit Blick auf das mögliche Verhalten der heimischen Eichenarten im fortschreitenden Klimawandel haben AREND et al. (2011) Jungpflanzen von Trauben-, Stiel- und Flaum-Eichen aus verschiedenen Herkunftorten der Schweiz hinsichtlich ihrer Wuchsreaktionen auf Trockenheit und / oder Wärme untersucht und eine höhere Bedeutung der Provenienz im Vergleich zur Artzugehörigkeit festgestellt. Entgegen der Auffassung von einer generell höheren Trockentoleranz der Flaum-Eiche (KÄTZEL et al. 2012) zeigte eine Herkunft dieser Art eine größere Sensitivität gegenüber Trockenheitsbelastung als zum Beispiel einzelne Traubeneichen. Die Unterschiede in der Empfindlichkeit ließen sich überraschenderweise nicht mit klimatischen Differenzen zwischen den Provenienzen erklären. Als Grund nehmen die Autoren die stark vom Menschen geprägte Geschichte der natürlichen Besiedelung durch die Eichen nach der Eiszeit an. Diese hat ihrer Meinung nach nicht zu einer optimalen lokalen Anpassung geführt, sondern war zum einen vom Zufall geprägt, zum anderen von anthropogenen Selektionskriterien wie Neigung zur Fruchtbildung oder Eignung zum Schiffbau (KLEINSCHMIT 1993).

In einer vergleichbaren Studie stellten AREND et al. (2012) artspezifische Unterschiede in der Wirkung von Trockenheit und Wärme auf photosynthetische Parameter fest: Die physiologischen Prozesse¹ der Stiel-Eiche zeigten eine stärkere Anfälligkeit für Trockenstress gegenüber Flaum- und Trauben-Eiche an, die sich weitgehend identisch verhielten. Dass

¹ Untersucht wurden die Stomata-Leitfähigkeit, die Netto-Photosynthese, das "*pre-dawn leaf water potential*" (Wassergehalt im Blatt) sowie die Effizienz des Photosystems II (variable im Verhältnis zu maximaler Fluoreszenz). Hinsichtlich der Stomata-Leitfähigkeit in Reaktion auf abnehmende Wassergehalte unterschieden sich die Arten nicht, wohl aber in der Netto-Photosynthese und in der Leistungsfähigkeit des Photosystems II.

die beiden letztgenannten Arten sich hinsichtlich der Standorte, auf denen sie aktuell vorkommen, dennoch unterscheiden, führen AREND et al. auf Eigenschaften jenseits der Photosynthese zurück. Als Beispiel nennen sie die verschieden stark ausgeprägte Fähigkeit der Wurzeln, Wasser in tieferen Bodenschichten zu erreichen, sowie die differenzierte Anfälligkeit gegen Embolien der Leitgefäße bei starkem Trockenstress. Nach COCHARD et al. (1992) ist diese Anfälligkeit bei Stiel-Eichen deutlich höher als bei Trauben- und Flaum-Eiche, die auch hinsichtlich dieses Phänomens ein sehr ähnliches Verhalten zeigen. DICKSON & TOMLINSSON (1996) ordnen *Q. robur* als "sensitiv" gegenüber Trockenbelastungen ein, *Q. petraea* als "intermediär", das heißt in einem höheren Maße trockentolerant.

Die Überlegungen von AREND et al. (2011) zur hohen intraspezifischen Variabilität von *Quercus petraea* und *Q. robur* lassen sich auch auf deutsche Verhältnisse übertragen. KRAHL-URBAN (1959) und KLEINSCHMIT (1993) weisen auf die prägenden Einflüsse des Menschen auf die heutige Verbreitung dieser Arten hin. Als ein Ergebnis ist zum Beispiel eine enorm hohe Streuung in der Ausprägung genetischer und phänotypischer Merkmale innerhalb von Eichenbeständen und zwischen ihnen zu beobachten (FINKELDEY 2001, SCHRÖDER et al. 2009a). Für die Anpassungsfähigkeit der Gattung ist diese große Vielfalt positiv zu bewerten (KÄTZEL 2008).

Eine Schlüsselrolle hinsichtlich der zu erwartenden langfristigen Folgen des Klimawandels für die Eiche in Nordostdeutschland spielt die Anpassungsfähigkeit auf Populations- und Art-Ebene. In diesem Zusammenhang wird kontrovers diskutiert, ob und mit welcher Geschwindigkeit sich Baumpopulationen auch ohne menschliche Förderung durch Transfer von Saatgut an die prognostizierten schnellen Klimaänderungen genetisch anpassen können (BOLTE & DEGEN 2010). Die Geschwindigkeit der natürlichen Saatgutverbreitung allein wird gerade im Fall der Eiche nicht hoch genug sein, um eine ausreichende genetische Anpassung zu gewährleisten (SAVOLAINEN et al. 2007; PETIT et al. 2008). Erfolgversprechender, weil schneller und über größere Distanzen möglich, erscheint der Genfluss über den Pollen, der vom Wind (oder bei anderen Baumarten durch Insekten) transportiert wird und so dazu führen kann, dass besser angepasstes genetisches Material aus anderen Regionen mit höherer Geschwindigkeit in heimischen Wäldern Fuß fasst (SAVOLAINEN et al. 2007; BUSCHBOM et al. 2012). Noch effektiver sind menschliche Aktivitäten zur Unterstützung der natürlichen Wanderung als "*assisted migration*" (PETIT et al. 2008), indem Saat- oder Pflanzgut aus bestimmten klimatischen Verhältnissen dort eingesetzt wird, wo ähnliche Verhältnisse als Folge des Klimawandels mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind.

Die Verwendung von "Klimahüllen" zur Sensitivitätsanalyse, das heißt zur Einschätzung der möglichen Anfälligkeit der Baumarten gegenüber dem Klimawandel, ist aus mehreren Gründen kritisch zu sehen (BOLTE et al. 2008; Abb. 2-14). Zu ihren in Abschnitt 2.4.2 bereits beschriebenen Grenzen kommt hinzu, dass sich für die hier untersuchten Bestände so gut wie keine belastbaren Zusammenhänge zwischen den interannuellen Schwankungen jahresweise kumulierter Witterungsparameter und dem Jahrringindex ergaben. Das legt den Schluss nahe, dass für das Wachstum als essentielles Element der Vitalität andere Faktoren

entscheidend sind, zum Beispiel die Verteilung der Niederschläge im Jahr, Temperaturextreme sowie ungünstige Kombinationen beider Parameter. Vor diesem Hintergrund werden Klimahüllen zwar als taugliches Instrument zum Aufzeigen der aktuellen Verteilung von Baumarten angesehen, sind aber – wenn sie isoliert und ohne weitere Einschränkungen angewandt werden – ungeeignet für Aussagen über die Vitalität der Arten und ihren Anteil an den Wäldern der Zukunft.

Die möglichen Beiträge angepasster waldbaulicher Strategien zur Stabilisierung von Waldökosystemen sind im Abschnitt 2.4.3 ab Seite 55 bereits allgemein umrissen worden. Im Sinne der Vulnerabilitätsanalyse trägt der dort beschriebene "Nachhaltumbau" vor allem zur Steigerung der Anpassungsfähigkeit sowie zur Minderung der Sensitivität in der Zukunft bei (KÄTZEL 2008; WAGNER 2008). KÖHL et al. (2010) haben nachgewiesen, dass geeignete Formen der Waldbewirtschaftung im Sinne nachhaltiger Nutzungsstrategien zu einer stärkeren Begrenzung ("Mitigation") der Exposition beitragen können, also zur Fixierung von Kohlendioxid in Holz und anderer Biomasse und damit zur Reduktion klimaschädlicher Emissionen, als unbewirtschaftete Wälder.

Mit Blick auf die Trauben-Eiche in Brandenburg kann man aus den Ergebnissen dieser Arbeit und aus der Literatur folgende Schlussfolgerungen hinsichtlich waldbaulicher Grundsätze ableiten, die die Vulnerabilität verringern:

- Individuelle Vitalität ist Voraussetzung für die Bestandesstabilität. Beide Ebenen sind deshalb sowohl getrennt als auch im Zusammenhang zu betrachten und zu fördern.
- Die Einzelbaumvitalität gründet sich vor allem auf große, gut ausgeformte Kronen mit einem hohen Feinreisiganteil. Nach MAYER (1958) und SPIECKER (2007) ist es wichtig, dass der Kronenaufbau nicht als Reaktion auf seltene und drastische Eingriffe in das Bestandesgefüge erfolgt, sondern durch zeitig beginnende und häufige Maßnahmen mit abnehmender Eingriffsstärke. Dies dient auch der gleichmäßigen und zur Kronenausformung proportionalen Entwicklung des Wurzelsystems.
- Bei der Auslese von Einzelbäumen ist eine hohe Vitalität "das überragende Kriterium in jungen Eichenbeständen" (MOSANDL et al. 1991). Gerade im Hinblick auf zukünftig noch steigende Belastungen ist im Zweifel immer der vitalere Baum zu fördern.
- Auf Grund des Charakters der Trauben-Eiche als Lichtbaumart, gerade in höheren Altern, hemmt ein vollständiger Bestandesschluss (das heißt ein geschlossenes Kronendach mit sich berührenden Kronen) ihre Kronenentwicklung. Der ungehinderte Kronenausbau ist nach SCHÄDELIN (1942) nur dann zu erreichen, wenn der Kronenschluss dauerhaft unterbrochen ist.
- Die Chancen für vitale Trauben-Eiche sind auf geeigneten Standorten am größten. Dazu zählen mäßig bis überdurchschnittlich nährkräftige Böden, die zur Vergrößerung der Wasserspeicherkapazität möglichst humusreich und von Schluff- und Lehmschichten unterlagert sein sollten.

- Die Stabilität von eichengeprägten Beständen wird durch Beimischung anderer Baumarten vergrößert. Das gilt vor allem für Laubholzarten, die nicht so wuchskräftig sind, dass sie die Eichen bedrängen, sowie für später eingebrachte oder natürlich ankommende Bäume. Als positive Wirkungen sind der Bodenschutz durch Beschattung und durch Humusanreicherung zu nennen, die Verbesserung des Bestandesinnenklimas sowie die Vergrößerung der Habitatvielfalt für Tierarten, die als natürliche Gegenspieler der Eichenfraßgesellschaft fungieren können.
- Wenn die Eiche die prägende Baumart in den Mischbeständen bleiben soll, dann ist es in Abhängigkeit von der Wuchsdynamik und der Konkurrenzkraft der anderen Baumarten oft nötig, die Bestandesentwicklung waldbaulich zu steuern. In Verjüngungsschichten muss eventuell der Anteil natürlich aufkommender Kiefern reduziert werden, in späteren Altersphasen ist gegebenenfalls der Konkurrenzdruck durch schneller wachsende Rot-Buchen durch deren Entnahme zu mindern.

Die oben genannten Grundsätze decken sich nicht völlig mit den klassischen Bewirtschaftungsstrategien für Eiche, wie sie zum Beispiel KRAHL-URBAN (1959), CONRADI et al. (2004) oder LOCKOW (2006b) formuliert haben. Diese folgen unter Annahme mehr oder weniger konstanter Standortbedingungen dem Ziel, die Nutzungsfunktion zu optimieren, ohne die anderen Waldfunktionen zu stark zu beeinträchtigen. Optimale Stabilität im Sinne vitaler Einzelbäume scheint sich dagegen eher auf Kosten der Nutzungsfunktionen erreichen zu lassen, da wegen der geringeren Bestandesdichte der Flächenertrag und wegen der großen, tief angesetzten Kronen der Anteil höherwertigen Schaftholzes sinken. Aus mehreren Gründen ist es jedoch falsch, daraus einen Gegensatz zu konstruieren zwischen der Bewirtschaftung nach Nutzungsgesichtspunkten und vitalitätszentrierten Strategien:

- (a) In den aktuellen forstwirtschaftlichen Behandlungsvorschriften der Bundesländer ist bereits eine hohe Gewichtung der Vitalität als Teilziel der Pflegemaßnahmen enthalten (vergleiche MOSANDL et al. 1991). In den Waldbaurichtlinien für das Land Brandenburg (MLUR 2004) wird zum Beispiel für die Eiche postuliert: "Ziel der Eichenbewirtschaftung sind gesunde und stabile Mischbestände" (CONRADI et al. 2004).
- (b) Die Länge der forstlichen Produktionszeiträume gerade bei der Eiche führt dazu, dass sich Maßnahmen wie etwa die Erziehung langer astfreier Stämme, die kurz- bis mittelfristig das finanzielle Betriebsergebnis steigern, wegen der ungewissen Folgen des Klimawandels zunehmend verbieten. Das finanzielle Risiko von Ertragseinbußen durch Zwangsnutzungen nach Stürmen oder Insektenkalamitäten erfordert eine verantwortungsbewusste forstliche Planung unter Ausschluss riskanter Behandlungsverfahren¹.
- (c) Die in vielen Bewirtschaftungskonzepten vorherrschende Strategie der Konzentration von Aufwand, Zuwachs und Wertleistung auf "Zukunftsbäume" (Z-Bäume) zeigt, dass

¹ Auf Risiken von Behandlungsstrategien, die sich vorrangig auf die Holzqualität richten, weist Spiecker (2007) hin: "Je mehr Bedeutung der Qualität gegenüber der Vitalität bei der Auswahl [von Z-Bäumen] beigemessen wird, und je später mit der Förderung begonnen wird, umso weiter entfernt man sich von den natürlichen Selektionsprinzipien. Nur durch intensive Pflege können die damit verbundenen Risiken vermindert werden."

der Fokus von Pflege- und Durchforstungsmaßnahmen bereits heute hauptsächlich auf dem Einzelbaum liegt (CONRADI et al. 2004; LOCKOW 2006b; SPIECKER 2007).

Unter dem Gesichtspunkt der Optimierung der Einzelbaumkronen ergibt sich trotz der weitreichenden Übereinstimmungen ein Spannungsfeld zu nutzungsorientierten Strategien. LOCKOW (2006a) belegt zum Beispiel anhand von Versuchsflächen in Brandenburg, dass die Standraumproduktivität bei kleinkronigen Bäumen höher ist als bei großkronigen. Das bedeutet, dass pro Quadratmeter Bestandesfläche in dichten Beständen mit entsprechend schmalen Kronen mehr Holzvolumen erzeugt werden kann als in weniger dichten Beständen, in denen die Bäume breitere Kronen entwickeln. Jegliche "übermäßige" Förderung des Einzelbaums durch Unterbrechen des Kronenschlusses führt zu Grundflächen- und Volumendefiziten im Vergleich zu dicht geschlossenen Beständen. (Die biologisch-physiologischen Zusammenhänge, die dazu führen, dass mit immer größer werdenden Standräumen nicht automatisch ansteigende Zuwachsleistungen des BHD und der Kronenbreite verbunden sind, sollen hier nicht weiter diskutiert werden.) Es kommt zur Senkung der Vulnerabilität also darauf an, die richtige Balance zwischen Flächenertrag und Einzelbaumstabilität zu finden. Bei zu großen Baumabständen kommt es zur Auflichtung der Bestände mit starker Entwicklung von Begleit- beziehungsweise Bodenvegetation. Diese verringert die Wasserverfügbarkeit für die Bäume und steigert wiederum deren Vulnerabilität. Grundsätzlich gilt, dass "durch Versäumnisse notwendiger Pflegemaßnahmen mehr Schaden angerichtet wird, als durch gelegentliche Übersteigerung einer Durchforstung" (MAYER 1958). Zu geringe Bestockungsdichten sind aber auch deshalb zu vermeiden, weil die Erzeugung des nachwachsenden Rohstoffs Holz (dessen Verkauf noch immer mehr als 90 Prozent der durch die Forstbetriebe realisierten Erlöse ausmacht) in den heimischen Wäldern auch in Zukunft eine wichtige Aufgabe bleibt.

Der vielerorts nachgewiesene Anstieg der Zuwächse auch in Eichenbeständen (BADEAU et al. 1996) zeigt, dass sich die Möglichkeiten vergrößert haben, auch mit geringeren Stammzahlen zufriedenstellende Holzerträge zu realisieren. UTSCHIG et al. (2006) haben die von ihnen beobachteten knapp 25 Prozent Volumensteigerung von Eichen-Versuchsflächen gegenüber dem Niveau von vor 50 Jahren in einen "Umwelteffekt" von etwa 13 und einen "Durchforstungseffekt" von gut 11 Prozent aufgetrennt¹. Obwohl die Resultate nicht ohne Weiteres auf Nordostdeutschland übertragen werden können, zeigen sie doch die Richtung an, in der auch für Brandenburger Bedingungen das Gleichgewicht zwischen Konzentration auf die optimale Entwicklung des Einzelbaums und möglichst hohem Holzertrag neu gefunden werden müsste. Entsprechende Versuche auch unter Einbeziehung extremer Varianten wie der konsequenten Begünstigung der wuchskräftigsten, vitalsten Bäume werden vor diesem Hintergrund als dringend nötig angesehen.

¹ Der Durchforstungseffekt wird "gemessen an der Veränderung des Volumens des Grundflächenmittelstammes mäßig durchforsteter Bestände im Vergleich zu stark durchforsteten Beständen" (UTSCHIG et al. 2006).

Die Diskussion geeigneter waldbaulicher Strategien führt in einen Einflussbereich, der bis hierhin kaum zur Sprache gekommen ist, aber große Bedeutung für die Beurteilung der Vulnerabilität hat. Dabei handelt es sich um die gesellschaftliche Dimension sowohl der Sensitivität als auch des Anpassungsvermögens von Eichen unter den regionalen Bedingungen. Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, sind alle eichengeprägte Waldökosysteme in Brandenburg mehr oder weniger anthropogen geprägt, entweder direkt oder indirekt, kurzfristig oder langfristig (RÜFFER & KÄTZEL 2006). Ihre Zukunft ist deshalb ebenfalls von den Einflüssen der menschlichen Gesellschaft abhängig. Das beginnt im Bereich der Exposition, da der Klimawandel als ihr Hauptelement mit höchster Wahrscheinlichkeit eine Folge der Treibhausgasemissionen ist, die beim Verbrauch fossiler Energieträger durch die Menschen entstehen (NAKIĆENOVIĆ & SWART 2000). Die Sensitivität der Bestände gegenüber dieser Exposition resultiert aus ihrer historischen Behandlung einschließlich der anthropogenen Standortveränderungen zum Beispiel durch Streunutzung (NOACK 2012; 2.2.6). Auf Grund der relativen Trägheit der Waldökosysteme bestimmen diese historischen Einflüsse zum Teil auch die Anpassungsfähigkeit in der Zukunft.

Eine noch größere Rolle für die Anpassungskapazität und damit für die Vulnerabilität spielen die Entscheidungen zur aktuellen und zukünftigen Gestaltung der Wälder. Sie leiten sich aus den Funktionen ab, die der Wald für die Gesellschaft erfüllen soll, und aus den Ressourcen, die dafür bereit gestellt werden. An den darüber geführten Diskussionen ist (nicht nur in Brandenburg) eine zunehmende Zahl vielfältigster Akteure und Interessenvertreter beteiligt. Darunter sind neben den zuständigen Bundes- und Landesministerien mit ihren Forstverwaltungen auch Naturschutzverbände, private und kommunale Waldbesitzer, jagdliche Interessenträger, Touristikgruppen, lokale und regionale Verwaltungen sowie weitere Landnutzer. Der rechtliche Rahmen der Waldbewirtschaftung wird außerdem zunehmend durch überstaatliche Institutionen wie die Europäische Union zum Beispiel in Form von Schutzgebietsrichtlinien mitbestimmt. In diesem komplexen und dynamischen Umfeld entscheidet sich, welche Maßnahmen und Strategien die Wirtschaftler vor Ort umsetzen können, aber auch, welche zu vermeiden oder zu unterlassen sind.

Da sowohl ergriffene als auch unterlassene Maßnahmen das konkrete Bild der Bestände und damit wenigstens teilweise auch ihre Anpassungsfähigkeit formen, ist die insgesamt resultierende Vulnerabilität ebenfalls eine Folge des gesellschaftlichen Interessenausgleichs. Das gilt auch dafür, welches Maß an "Impakt", welche Breite an Resilienz durch die maßgeblichen Interessenträger noch als akzeptabel beurteilt werden. Es geht dabei um das (Leit-) Bild, das die Menschen beziehungsweise deren Entscheidungsträger vom Wald, von seinen Funktionen und Nutzungsmöglichkeiten, von seinem Wert im umfassenden Sinn haben. Für eine weiterreichende Abschätzung der zukünftigen Gefahren nicht nur durch den Klimawandel ist es deshalb unerlässlich nötig, mögliche Gefahren für den Wald zu erfassen und zu beurteilen, die sich indirekt aus Veränderungen in der Gesellschaft und ihren Ansprüchen an den Wald ergeben.

Politische Themen wie die "Energiewende", die die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen durch verstärkte Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Sonnenlicht und Holz verringern soll, sind für Wald und Forstwirtschaft von größter Relevanz. Der erhöhte Druck, auch Dünnholz und Kronenmaterial in "Biomassekraftwerken" zu verbrennen, beeinflusst zum Beispiel die Stoffkreisläufe und die Produktivität der Standorte negativ. Außerdem kann es dazu kommen, dass zur Erzeugung von Solarenergie bisher mit Wald bestandene Flächen beansprucht werden. Der Rechtfertigungsdruck gegenüber solchen positiv konnotierten "Angriffen" auf Wälder ist enorm hoch. Aus der mehrheitlich weitab vom Wald lebenden Öffentlichkeit kommen außerdem immer wieder Forderungen nach Unterschutzstellung großer Waldflächen. Sie resultieren einerseits aus dem schlechten Image, das die Holznutzung in heimischen Wäldern (nicht nur, aber eben auch dort) oft hat. Andererseits zeugen sie von der Sehnsucht nach "gesunder", ungestörter Natur, die im Wald gesucht wird, als Reaktion auf die zunehmend naturfernen, zum Teil als bedrohlich empfundenen Verhältnisse im städtischen Umfeld. All dies wird – aller inflationären Verwendung des Begriffs "Nachhaltigkeit" zum Trotz – grundiert durch ein kaum vorhandenes Wissen um die Langfristigkeit, die ökologische Komplexität und die historische Bedingtheit der Prozesse im Wald, aber auch um die Wichtigkeit weiterer menschlicher Steuerung dieser Prozesse.

Aus diesen Erörterungen wird klar, dass die Zukunft der Trauben-Eiche auch von den Ergebnissen einer breiten gesellschaftlichen Diskussion zu Sinn und Zweck der Eichen- sowie generell der Waldbewirtschaftung abhängt. Neben der nachhaltigen, an die lokalen Bedingungen angepassten Holznutzung können Wälder auch Schutz-, Erholungs- und Bildungsfunktionen erfüllen. Die im konkreten Bestand oder auf größerer räumlicher Ebene anzustrebende Gewichtsverteilung zwischen den Funktionen kann und muss gesellschaftlich immer wieder ausgehandelt werden. Von allen Beteiligten sind dabei Denken und Handeln über den eigenen "Tellerrand" hinaus gefordert, da globale Prozesse wie der Klimawandel die vielfältigen Funktionen des Waldes gleichermaßen bedrohen¹. Ohne entsprechende Aufwendungen und Bemühungen wird man die vorbildliche Funktionenvielfalt, wie sie in vielen mitteleuropäischen Wäldern noch besteht, nicht erhalten können.

Notwendige Voraussetzung einer höheren gesellschaftlichen Wertschätzung des Waldes ist ein besseres allgemeines Wissen um seine Bedeutung, das durch "Bildungsarbeit" von Fachleuten aus forstlicher Praxis und Wissenschaft gefördert werden muss. Damit lässt sich auch die auf politischer Ebene auszuhandelnde Akzeptanz für die Forstwirtschaft steigern. Diese bestimmt das Ausmaß der Ressourcen, die für Verwaltung und Bewirtschaftung der Wälder zur Verfügung stehen. Davon hängen sowohl die konkrete Form der Bestandesbehandlung wie auch deren langfristige Zielsetzungen ab. Die bewirtschaftende Steuerung von Eichenwäldern folgt zum Beispiel in der Regel dem Ziel der "Wertholzerzeugung" in Form qualitativ hochwertigen, astfreien Stammholzes. Aus waldbaulicher Sicht bestehen die größten Aussichten auf dieses Sortiment bei stabilen Einzelbäumen mit hinreichendem Wuchsraum

¹ Die möglichen negativen Auswirkungen des Klimawandels zum Beispiel auf den Naturschutz beschreiben MILAD et al. (2011).

aus möglichst zweischichtigen Beständen, das heißt mit "dienendem" Unter- und Zwischenstand aus schattenertragenden Baumarten in jüngerem Alter (LÜPKE 1998). Der für derartige Bestände notwendige betriebliche Aufwand wird jedoch in Zukunft angesichts massiver Stellenkürzungen in den staatlichen Forstverwaltungen und zunehmenden ökonomischen Drucks zumindest im Landeswald kaum noch zu leisten sein. Es ist also nicht nur auf Grund der Ungewissheiten bezüglich der natürlichen Folgen des Klimawandels, sondern auch wegen sich ändernder gesellschaftlicher Bedingungen nötig, die auf sehr lange Zeiträume ausgerichteten Behandlungsstrategien für Eichenwälder zu überdenken, Bewirtschaftungsziele "jenseits des Wertholzziels"¹ zu definieren und Wege zu ihrer Erreichung einzuschlagen.

Ein anderes unmittelbar für die Trauben-Eiche bedeutsames Beispiel für die Kopplung zwischen gesellschaftlicher Akzeptanz und Zukunftsaussichten sind die Bedrohungen durch Kahlfraß nach Massenvermehrungen bestimmter Insekten (MÖLLER et al. 2006; MILLARD & WAY 2011). Gerade in Kombination mit anderen Belastungen können die dadurch verursachten massiven Laubverluste das Überleben ganzer Bestände gefährden. Es ist möglich, in solchen Situationen den Fraßdruck durch gezielte Anwendung spezieller Insektizide zu verringern. Um damit gerade bei invasiven Arten wie dem oben bereits genannten Eichenprozessionsspinner Erfolg zu haben, bedarf es nicht nur für die konkrete Maßnahme, sondern auch für die vorhergehende Forschung und Erprobung ausreichender Mittel. Ob das entsprechende Bekämpfungsmittel termingerecht und flächengenau ausgebracht werden kann, hängt davon ab, ob die vorher nötigen administrativen Prozesse kurz und einfach sind, aber eben auch ganz allgemein davon, ob die Bekämpfung wegen ihrer Bedeutung für vitale und leistungsfähige Wälder gesellschaftlich akzeptiert ist.

Das Ende oder die drastische Minderung forstlicher Steuerung würde sich negativ auf die Zukunftschancen der Eiche auswirken. Ohne anpassungsfördernde Maßnahmen wie "*assisted migration*" und ohne künstliche Verjüngung durch Pflanzung hätte es die Eiche auf Grund ihrer langen Generationszyklen und ihrer geringen Wanderungsschwierigkeit schwerer, sich an schnelle Standortveränderungen anzupassen (JUMP & PEÑUELAS 2005). In der Verjüngungsphase sind Eichen wegen ihrer relativ hohen Lichtansprüche auf Konkurrenzregelnde Eingriffe angewiesen, wenn sie sich gegen schattentolerantere Baumarten behaupten sollen (LÜPKE 1998, LÜPKE & HAUSKELLER-BULLERJAHN 1999; DOBROWOLSKA 2008).

Die natürliche Verjüngung der Eiche kann erschwert werden, wenn die nötigen steuernden Eingriffe wegen erhöhter naturschutzfachlicher Beschränkungen nicht durchführbar sind (JEDICKE & HACKES 2005) oder wegen Ressourcenmangels ganz unterbleiben. So würde langfristig eine naturnahe Entwicklung ohne Eingriffe durch forstliche Bewirtschaftung den

¹ Diese Formulierung geht auf R. KÄTZEL (2009, in: ELMER et al. 2009) zurück. Auch in der Vergangenheit war es schwierig, über Zeiträume von ungefähr zwei Jahrhunderten ein Bewirtschaftungsziel zu verfolgen. Das wird zum Beispiel daran deutlich, dass aus dem Landeswald Brandenburgs im Schnitt der letzten zwanzig Jahre nicht mehr als 400 m³ Eichenwertholz pro Jahr verkauft werden konnten, was etwa 0,03 Prozent des gesamten verkauften Holzes entspricht (Quelle: Rohholzpreisberichte des Landes Brandenburg).

Eichenanteil in Laubwaldgesellschaften auf den meisten Standorten wahrscheinlich reduzieren. Beispielhaft lässt sich dies im Naturwald "Mönchseichen" in Nordbrandenburg beobachten, wo nach HÖHNE et al. (2006) die Buche immer mehr Druck auf die Eiche ausübt und ihren Flächenanteil vor allem in der Verjüngungsschicht in den vergangenen Jahrzehnten stetig ausgedehnt hat. Wie weit diese Nachteile durch die mögliche Verbesserung der Konkurrenzbedingungen gegenüber der Buche als Folge zunehmender Sommertrockenheit und steigender Temperaturen kompensiert werden können, ist nicht vorauszusehen.

5.3 Ausblick

5.3.1 Klimawandelforschung und Risikomanagement

Die meisten Modellsysteme zur Abschätzung des Klimawandelverlaufs und seiner Auswirkungen gehen von einem stetigen, relativ monotonen Ansteigen sowohl der globalen Mitteltemperatur als auch der diesen Anstieg treibenden Emissionen aus. Zu wenig wird bisher dagegen auf mögliche drastische, katastrophenartige Veränderungen in Ursachen und Wirkungen eingegangen. Nach WRIGHT & ERICKSON (2003) verstärken oder reduzieren Katastrophen als Extremereignisse, die mit geringer Wahrscheinlichkeit, aber enormer Wirkung auftreten, bestehende Trends, sie können aber auch als Schwellen beziehungsweise "Türöffner" zu stark verändertem Systemverhalten fungieren (BRESHEARS et al. 2011). Ein solcher "*Trigger*-Effekt" kann auch indirekt wirksam werden: Wenn zum Beispiel durch eine außergewöhnlich intensive Dürreperiode Bäume in kurzer Zeit sehr geschwächt werden, dann verbessern sich abrupt die Ernährungs- und Vermehrungsvoraussetzungen für Schwächeparasiten, die in einer Rückkopplungsschleife weitere Bäume zum Absterben bringen können (WHITEHEAD 2011).

Direkt wie indirekt werden Extremereignisse die zukünftige Entwicklung der Waldökosysteme sehr deutlich prägen (ROUAULT et al. 2006¹). Auswertungen des Witterungsgeschehens der letzten Jahrzehnte (SCHÄR et al. 2004; KIRILENKO & SEDJO 2007) haben gezeigt, dass die Häufigkeit von Extremereignissen zugenommen hat. Dementsprechend gehen eine Reihe von Modellrechnungen (zum Beispiel GJERDE et al. 1999) davon aus, dass dieser Trend mit fortschreitendem Klimawandel bestehen bleibt. Damit steigt aber auch die Wahrscheinlichkeit, dass diese Katastrophen die Schätzgenauigkeit der Klimamodelle signifikant verringern, was eine zusätzliche Unsicherheitskomponente in die Klimawandeldiskussion einführt (REYER et al. 2013). Szenarien beziehungsweise extrapolierende Modelle des Anpassungsvermögens der Waldökosysteme sollten deshalb auch eine Risikokomponente enthalten, die die Wirkung von Witterungsextremen in die Schätzungen integriert.

¹ " *The most important effects of climate change on temperate forests will probably be mediated through changes in disturbance regimes such as fire, insects and pathogens. Hence, it is useful to consider how climate change will affect these disturbances.*" (ROUAULT et al. 2006)

Den aktuellen Stand und zukünftige Möglichkeiten, Katastrophen mit ihren Folgen in die Bewirtschaftung von Wäldern einzubeziehen, fassen zum Beispiel HANEWINKEL et al. (2011) vor allem aus forstökonomischer Sicht sowie LÜPKE (2009) für den Waldbau zusammen. KIRILENKO & SEDJO (2007) integrieren mögliche Veränderungen auf der Abnehmer- beziehungsweise Nachfrageseite in die Einschätzung möglicher Risiken für die Forstwirtschaft der Zukunft und weisen auf die wirtschaftlichen Verluste durch die Holzvernichtung bei Extremereignissen mit hohem Schadausmaß hin.

Mit allgemeinerem forstlichen Fokus setzen sich unter anderem SPITTLEHOUSE & STEWARD (2003), BOLTE & IBISCH (2007), BOLTE & DEGEN (2010) sowie – auf europäischer Ebene – LINDNER et al. (2010) mit möglichen Folgen des Klimawandels auseinander. Sie alle betonen die Unsicherheiten, die mit der Einschätzung zukünftiger Risiken einerseits und der Anpassungsfähigkeit der Wälder andererseits verbunden sind. Dabei werden der "normale", quasi-stetige Klimawandel und Katastrophen im Sinne von "Störungen" als zwei gesonderte Risikogruppen berücksichtigt. In der Regel unterscheiden sich die von den Autoren empfohlenen Maßnahmen zur Vorbeugung und Anpassung nicht wesentlich zwischen den Risikogruppen. Auf allgemeiner Ebene ist daraus die Notwendigkeit abzuleiten, Anpassung an die Klimawandelfolgen und Risikomanagement in alle künftigen Bewirtschaftungsstrategien einzubeziehen. Diese sollten jedoch auch so plastisch wie möglich in regionalbezogene waldbauliche Strategien übersetzt werden (OVERBECK et al. 2012).

Auch bei stetiger, nicht-sprunghafter Veränderung des Klimas wächst das Risiko, dass sich dadurch andere Belastungen für die Vitalität in ihrer Wirkung verstärken können. Für die nachteiligen Einflüsse von Insekten haben dies zum Beispiel DELUCIA et al. (2008) belegt. Obwohl sie sich dabei auf den Vergleich fossiler Fraßschäden bei unterschiedlichen Temperaturverhältnissen konzentrierten, kann man die deutlich förderliche Wirkung wärmerer Witterung auf Vielfalt und Abundanz vieler Insekten auch auf heutige Bedingungen übertragen (ROUAULT et al. 2006). In Extremfällen jedoch kann zum Beispiel zu starke Trockenheit auch nachteilige Effekten auf Insektenpopulationen auf Bäumen haben. Für *Pinus edulis* ENGELM. im Südwesten der USA haben STONE et al. (2010) in Trockenjahren abnehmende Individuen- und Artenzahlen der meisten mit dieser Baumart vergesellschafteten Insektengattungen nachgewiesen, Diversität und Populationsdichte liefen im untersuchten Ökosystem gleichläufig mit dem Jahrringindex. Auf die extreme Hitze- und Trockenperioden im Sommer 2003 haben nach ROUAULT et al. (2006) in Frankreich vor allem die forstlich relevanten Käferarten positiv reagiert, während bei blattfressenden Schmetterlingsarten durch die trockenheitsbedingt reduzierte Nahrungsqualität verringerte Reproduktions- und Wachstumsraten auftraten. Nach der "*plant vigor*"-Hypothese profitieren eine Reihe von Insektengilden sogar von einer hohen Wuchskraft ihrer Nahrungs- und Wirtspflanzen (PRICE 1991). Es kommt also auch hier darauf an, die Wechselwirkungen im Detail zu analysieren und keine zu allgemeinen, vorschnellen Schlüsse zu ziehen.

5.3.2 Methodische Anregungen

Die Zusammenhänge zwischen Witterung, Zuwachs und Vitalität sind in dieser Arbeit zum einen auf Basis aller untersuchten Bäume analysiert worden, um Grundmuster in den Wechselwirkungen aufzudecken und Tendenzen zu beschreiben. Zur Prüfung möglicher Unterschiede in der Reaktion auf Umwelteinflüsse wurden die beprobten Bäume auf den Kernflächen in Teilkollektive je nach sozialem Status des Baumes im Bestandesgefüge aufgeteilt, beurteilt anhand der Stammklasse nach KRAFT (1884; siehe 3.1.4). Für aufbauende Untersuchungen der Vitalitätsverhältnisse erscheint es sinnvoll, alternative Teilkollektive zu bilden. Diese könnten zum Beispiel Individuen mit überdurchschnittlich hohen bzw. positiven Werten sowie mit unterdurchschnittlich schlechten beziehungsweise niedrigen Werten umfassen, um die für die beobachtete Spannweite in Vitalität und Zuwachs ursächlichen Faktoren genauer herauszuarbeiten. Folgende Merkmale könnte man zur Klassifizierung heranziehen:

- Kronenstruktur im Winterzustand nach KÖRVER et al. (1999);
- Laubverlust nach WZE-Verfahren (EICHHORN et al. 2006);
- jährlicher Radialzuwachs bzw. Jahrringbreite als Mittel der Jahre 2002-2006.

Die beschriebenen Gruppen sollten für die Kernflächen auf Ebene des Einzelbestandes gebildet werden; eine Zusammenfassung über die verschiedenen Flächen hinweg würde es schwer machen, die Einflüsse populationsbezogener zeitabhängiger Trends von gemeinsamen Tendenzen zu trennen. Hinsichtlich der *response*-Seite der Beziehungen sind die aus den hier zusammengefassten Analysen verfügbaren Daten jedoch begrenzt durch die verhältnismäßig geringe Zahl der Bohrkernproben auf den Kernflächen sowie (auf der Ursachebene) durch die Beschränkung der Kronenzustandsansprachen auf die Bohrkern-Bäume der Zusatzflächen. Damit ist dort die auswertbare Baumzahl zu gering, um daraus noch Gruppen bilden zu können, deren Mittelwerte sich signifikant unterscheiden würden. Durch die turnusgemäße Wiederholungsmessung der BHDs sind auf den Kernflächen bereits zusätzliche Zuwachsdaten verfügbar, die zum Beispiel für die Auswertungen in Abschnitt 4.1.2 genutzt wurden. In den kommenden Jahren werden auch die Zusatzflächen im fünfjährigen Abstand erneut aufgenommen, um weitere Daten zu erhalten, die nach den oben angeregten Kriterien gruppiert und vertieft analysiert werden könnten. Mit Hilfe des bereits vorliegenden Materials und gegebenenfalls durch gezielte Ergänzung mit neuen Probenahmen sollte außerdem auf die Erkenntnisse von CARRER (2011) zur individuellen und zeitlichen Variabilität in den Witterungs-Zuwachs-Beziehungen eingegangen werden. Wie bei Aufnahme der Kern- und Zusatzflächen ist darauf zu achten, bei neuen Erhebungen die Zuwachsinformationen aus den Bohrkernen durch möglichst viele einzelbaumbezogene Daten einschließlich der Stammfußkoordinaten zu ergänzen. Auf dieser Grundlage sollte in Anlehnung an die Untersuchungen von PIUTTI & CESCATI (1997) und BONN (1998, 2000) verstärkt auf die Wechselwirkungen zwischen Witterung, intra- und interspezifischer Konkurrenz und Zuwachseleistungen eingegangen werden.

Eine weitere Untersuchungsebene, die für zukünftige Arbeiten vorgeschlagen wird, ist die getrennte Analyse von Früh- und Spätholzbreiten (anstelle der Jahrringbreiten) auf ihre Korrelation zu Witterungsfaktoren. ECKSTEIN & SCHMIDT (1974) haben zum Beispiel das stärkste und einheitlichste Klimasignal in den Spätholzbreiten von *Quercus robur* gefunden. Am zweitstärksten reagierte die Jahrringbreite, am schwächsten die Frühholzbreite. Eine ähnliche Reihung fanden ZHANG (1997) für Stiel- und Trauben-Eiche. Auch BERGÈS et al. (2008) plädieren auf Grund ihrer umfangreichen Analysen zu ökologischen Einflüssen auf Jahrringparameter von französischen Eichen für getrennte Untersuchungen von Früh- und Spätholz. In dieser Arbeit unterblieben diese separaten Analysen zum einen, weil die Vergleichbarkeit mit einer Vielzahl jahrringbezogener Studien gewahrt bleiben sollte (BECK 2010; RÖHLE et al. 2010; ZANG et al. 2011), zum anderen wegen der begrenzten zeitlichen Ressourcen. In methodischer Hinsicht ist außerdem zu prüfen, inwieweit mit der eher groben visuellen Trennung zwischen Früh- und Spätholz die gleichen Anteile zustande kommen wie die auf der graphischen Auswertung von Dünnschnitten beruhende Methode, die GÜNTHER (2013) erarbeitet und angewandt hat¹.

Auf der nächstfeineren Untersuchungsebene sollten Analysen zum Zusammenhang zwischen Holzdichtemerkmalen und der individuellen Vitalität weitergeführt werden, wie sie von BAUMUNG (2010) anhand von Proben aus den Beständen auf K2 und K3 begonnen wurden. Auf Grund ihrer Anatomie mit den ringförmig angeordneten großen Tracheen bieten sich Eichen weiterhin für holzanatomisch orientierte Studien zur weiteren Aufklärung der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen an (GARCÍA-GONZÁLEZ & ECKSTEIN 2003; GARCÍA-GONZÁLEZ & FONTI 2008). Die Ansätze zur Schätzung der Wassernutzungseffizienz auf Basis der Isotopenverhältnisse des Kohlenstoffs (C^{12}/C^{13}), wie sie zum Beispiel ZANG et al. (2012) vorstellen, sind ebenfalls als künftige Analysemöglichkeit zu empfehlen.

Besonders interessant zur Untersuchung der Kombinationswirkungen abiotischer und biotischer Belastungen, zum Beispiel durch Trockenheit und Insektenfraß, sind Analyseansätze wie die von GIEGER & THOMAS (2002, 2005). An drei- bis fünfjährigen Eichen simulierten sie Trockenstressbedingungen allein und in Kombination mit Entlaubung und werteten die Effekte auf die Wurzelentwicklung, das Sprosswachstum sowie holzanatomische Eigenschaften aus. Sie fanden erheblich negativere Wirkungen der kombinierten Einflüsse im Vergleich zur Wirkung jeweils nur eines Belastungsfaktors auf gleichem Niveau. Auch experimentelle Studien an "erwachsenen" Bäumen wie die von BRÉDA et al. (1993) zum Wasserhaushalt in Trockenjahren sollten verstärkt durchgeführt werden, um das Verhalten der Eichen unter wahrscheinlich wärmeren Bedingungen mit zunehmenden Dürreperioden zutreffend einschätzen zu können. Als besonders erfolgversprechend für ein besseres Verständnis von Absterbeprozessen sind dabei Analysen der physiologischen Abläufe anzusehen, die den Wasserhaushalt und die Allokation der Assimilate im Zusammenhang untersuchen (RYAN 2011).

¹ Da ein Teil von GÜNTHERS Proben von den hier untersuchten Flächen K2 und K3 stammen, ist eine solche Methodenstudie gut möglich. Sie fand aus Zeitgründen aber bisher nicht statt.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung von Komplexwirkungen liegt es nahe, die Analysen nicht auf eine Wirkungsebene oder ein messbares Merkmal wie die Jahrringbreite zu begrenzen. Stattdessen sollten die Bäume als Organismus betrachtet werden. Künftige Untersuchungen müssten deshalb die Wirkungen externer Faktoren wie auch interner Abläufe auf der Ebene des Gesamtsystems (etwa als Biomasseproduktion der Pflanze) genauso wie in Bezug auf einzelne Baumkompartimente (oberirdische Holzmasse, Belaubung beziehungsweise Benadelung, Wurzelsystem) erfassen. Besonders zu beachten wären der Zustand von Grob- und Feinwurzeln, dessen Beziehungen zu Vitalität und Zuwachs des Baumes und die Konkurrenzverhältnisse im Wurzelbereich in gemischten Beständen (KALHOFF 1996; NEWMAN et al. 2006; REWALD & LEUSCHNER 2009). Derartige Analyseansätze werden beispielsweise am LFE in Eberswalde seit vielen Jahren verfolgt (vergleiche BAUM 2006; HORNSCHUCH et al. 2008; HORNSCHUCH 2009).

5.3.3 Sorgenkind oder Hoffnungsträger?

Auf Grund ihres speziellen Fokus kann diese Arbeit keine umfassenden und allgemeingültigen Empfehlungen für den Umgang mit der Trauben-Eiche geben. Stattdessen konzentriert sie sich auf die Schlüsse, die sich aus den intensiven Analysen des vergangenen Wachstums und der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen ableiten lassen. Sie lassen sich zu Risiken einerseits, Chancen andererseits sowie den Einflussmöglichkeiten für die forstliche Steuerung gruppieren. Diese drei Ebenen werden im Folgenden noch einmal zusammenfassen gegenüber gestellt.

Zu den *Risiken* zählen die Teilergebnisse, die eine zunehmende Einflussstärke der externen Faktoren, im engeren Sinne der Witterungsvariablen, belegen. Dabei handelt es sich um die zunehmenden Hinweise der dendroklimatologischen Auswertungen auf eine steigende Einheitlichkeit und Stärke der Kopplung der Jahrringindex-Zeitreihen an die Witterungssignale. Da die Autokorrelation als interne Pufferung exogener Effekte im untersuchten Material eine leicht abnehmende Tendenz zeigt, könnte die sich die Reaktionsstärke auf externe Faktoren verstärken. Die Klimaentwicklung nach dem verwendeten Szenario lässt in Verbindung mit diesen Hinweisen häufigere und intensivere Belastungen der Bäume durch Trockenheit mit negativen Folgen für Zuwachs und Vitalität erwarten. Die hier nicht untersuchten, generell aber schwer einschätzbaren Kombinationswirkungen der Witterung mit anderen Schadfaktoren, vor allem mit phytophagen Insekten und pathogenen Pilzen, steigern die Unsicherheit bezüglich der Anpassungskapazität der Bäume. Vitalitätseinbußen und Mortalität sind vor allem dort zu erwarten, wo die Baumart auf ungeeigneten Standorten angebaut und/oder waldbaulich so behandelt wurde, dass die Einzelbaumvitalität stark eingeschränkt ist. Unkalkulierbar bleiben nach allen Erwägungen die Gefahren drastisch veränderten Systemverhaltens nach *tipping points*, stark erhöhte Risiken durch extreme Witterungsverhältnisse sowie mögliche Schäden durch etablierte oder einwandernde biotische Schaderreger (invasive Arten).

Die *Chancen* für die Trauben-Eiche werden unter anderem darin gesehen, dass in den Analysen der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen Anpassungsreaktionen an die sich ändernden äußeren Bedingungen nachgewiesen werden konnten. Die unveränderte Häufigkeit von Weiserjahren zeigt zusammen mit der im Mittel stabil gebliebenen Sensitivität in den Jahrringbreiten-Zeitreihen, dass trotz steigender Temperaturen im Untersuchungszeitraum die Reaktionen der Bäume im Wesentlichen gleich geblieben sind. In Verbindung mit der vergleichsweise schwachen Zuwachsreaktion der Bäume auf das Extremjahr 2003 und der Stabilisierung des Kronenzustands seit 2006 wird die Erwartung abgeleitet, dass die Anpassungsfähigkeit der Trauben-Eiche auch im Szenariozeitraum bis 2055 nicht dauerhaft oder großflächig überschritten wird. Obwohl wie in der Vergangenheit einzelne Bäume und Bestände absterben werden, ist auch auf Grund der hohen genetischen Diversität der Baumart nicht davon auszugehen, dass ihr Anteil an der Waldfläche deutlich zurückgeht. Vor allem in den Regionen, wo die Versuchsbestände die schwächsten Kopplungen an Witterungseinflüsse zeigten, sowie auf Standorten mit besserer Bodenwasserverfügbarkeit kann von einer hohen Elastizität der Bäume ausgegangen werden.

Die *Handlungsoptionen* zum Stärken der Anpassungsfähigkeit umfassen im Wesentlichen die Steuerung der negativen und positiven Bedingungen, die dem menschlichen Einfluss zugänglich sind. Ihr Ausmaß wird wesentlich durch das soziale, politische und wirtschaftliche Gewicht des Waldes und die Interessen an seiner Nutzung bestimmt. Zu den Handlungsmöglichkeiten im engeren Sinne gehört die Förderung der individuellen Vitalität und Elastizität in Form großer, optimal belaubter Kronen in Verbindung mit gut entwickelten Wurzelsystemen. Die Mischung mit anderen Baumarten steigert die Bestandesstabilität, wobei die relative Konkurrenzschwäche der Eiche zu berücksichtigen ist. Verjüngungsmaßnahmen sollten auf die Erhaltung und Steigerung der genetischen Vielfalt ausgerichtet sein; durch "*assisted migration*" kann die zusätzliche Einführung geeigneter Provenienzen unterstützt werden. Individuen mit überdurchschnittlicher Vitalität sind in den frühen Pflegestadien besonders fördern. Die Konkurrenz um Wasser kann – unter Beachtung des Risikos zusätzlicher Verdunstung – durch geringere Bestandesdichten reduziert werden. Die höchsten Erfolgsaussichten für diese waldbaulichen Aktivitäten bestehen auf Standorten, die hinsichtlich ihrer Wasserspeicherkapazität begünstigt sind. Ein angepasstes Monitoring kann Bedrohungen zum Beispiel durch Insektenmassenvermehrungen rechtzeitig erkennen helfen, gegen die alle Bekämpfungsmöglichkeiten konsequent ausgeschöpft werden sollten.

Schlussbemerkungen

Forstleute planen und arbeiten mit dem Blick auf lange Zeiträume. Der Gegenstand ihrer Tätigkeit stellt gleichzeitig das Produkt der Arbeit früherer Generationen, das Objekt ihrer eigenen Anstrengungen wie auch die Voraussetzung für das Wohlergehen ihrer Nachkommen dar. Dieses Kontinuum wird einerseits von vielen kleinen und großen Entscheidungen unterschiedlichster Interessengruppen gestaltet, andererseits von den natürlichen Prozessen auf standörtlicher Ebene. Diese offenen und komplexen Systeme sind mit einer dritten Einflussenebene verknüpft, die OTTO (1994) unter dem Begriff der "Imponderabilien" zusammengefasst hat: zufällige Ereignisse, selbstverstärkende Rückkopplungen, unvorhersehbare Richtungsänderungen sowie asynchrone und nichtlineare Entwicklungen.

Auf Grund dieser Komplexität entzieht sich der Wald der vollständigen Regelung durch die menschliche Gesellschaft. Im aktuellen mitteleuropäischen Kontext ist er vielleicht gerade deshalb so etwas wie eine Projektionsfläche für eine Vielzahl von Vorstellungen, deren Erfüllung in anderen Teilen der Kulturlandschaft nicht mehr realisierbar ist: Er soll das Erleben von "Natur" genauso wie sportliche Betätigung ermöglichen, das Überleben bedrohter Tiere und Pflanzen sichern, das bedrohliche Kohlendioxid aus der Atmosphäre ziehen, nachwachsende Rohstoffe, sauberes Wasser und frische Luft liefern und einiges mehr. Um diesen Anforderungen auch nur annähernd gerecht zu werden, bedarf es einer bewussten, geplanten Gestaltung als Fördern oder Hemmen der natürlichen "Gratiskräfte". Dabei kann es nicht darum gehen, kurzfristige Maßstäbe von finanzieller Rentabilität über die Notwendigkeit steuernder, gestaltender Einwirkung entscheiden zu lassen.

In Brandenburg wurde in den vergangenen Jahren unter der Maßgabe, die Ausgaben der öffentlichen Hand zu reduzieren, eine funktionstüchtige und leistungsfähige Einheitsforstverwaltung zerstört. Für die Wälder, für den ländlichen Raum, für die vielfältigen Leistungen des Waldes für die Allgemeinheit ist dies in meinen Augen eine sehr nachteilige Entwicklung. Die Möglichkeiten der Gesellschaft, die Wälder gezielt und zum Nutzen aller zu gestalten, schwinden gerade in einer Zeit, in der die planvolle Einflussnahme im Sinne einer pro-aktiven, adaptiven Gestaltung der Waldökosysteme von besonderer Dringlichkeit ist. Forschungsarbeiten wie die hiermit vorgelegte sollten meinem Verständnis nach diskutiert und umgesetzt werden – dazu bedarf es aber eines geeigneten Rahmens, der gerade zusehends schwindet. Dieses Verschwinden stellt den Zweck anwendungsorientierter Forschung entscheidend in Frage. In diesem Sinne hoffe ich nicht nur, dass einige der zusammengetragenen Ergebnisse ihren Weg in die forstliche Praxis finden. Viel mehr noch hoffe ich, dass dies in einem Umfeld geschieht, in dem erkannt wurde, welche grundlegende Bedeutung Wald und seine Bewirtschaftung für den Menschen haben, und in dem dieses Wissen die Behandlung der Forstwirtschaft wie auch der Forstleute in der Gesellschaft leitet.

6 Zusammenfassung

– Zielstellung –

Die Trauben-Eiche (*Quercus petraea* [MATT.] LIEBL.) ist sowohl ökologisch als auch ökonomisch eine prägende Baumart im nordostdeutschen Tiefland, vor allem in dessen subkontinental geprägten Anteilen. Durch die verstärkte Verwendung im ökologischen Waldumbau ist ihre Bedeutung in den vergangenen zwei Jahrzehnten zusätzlich gewachsen. Seit längerer Zeit haben jedoch lokal bis regional drastische Vitalitätseinbußen zu Diskussionen um ihre Verwendbarkeit für den Wald der Zukunft geführt. Unter Annahme wahrscheinlich weiter fortschreitender Veränderungen des Klimas stellen sich Fragen nach der grundsätzlichen Anpassungsfähigkeit der Baumart im Sinne der Überlebensfähigkeit, nach den Beziehungen zwischen Vitalitätszustand und Wuchsverhalten sowie nach möglichen Entwicklungstendenzen dieser Parameter.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Arbeit die Zusammenhänge zwischen Vitalität und Zuwachs sowie die Effekte der Witterung auf die Jahrringbreite als wesentlichem Vitalitätsindikator. Die retrospektive Analyse dieser Beziehungen dient dazu, das mögliche Verhalten des Witterungs-Zuwachs-Komplexes in der Zukunft abzuschätzen und damit die Risiken einer forstlichen Schwerpunktsetzung auf die Trauben-Eiche im Untersuchungsgebiet Nordostdeutschland genauer zu fassen. Folgende Forschungsfragen, die sich jeweils in mehrere Teilthemen aufgliedern, stehen dabei im Mittelpunkt:

- (a) Wie ist die individuelle Kronenvitalität bei Anwendung von zwei gutachtlichen Methoden zu beurteilen, und welche Zusammenhänge bestehen mit dem Zuwachs der Bäume?
- (b) In welchem Verhältnis stehen die Ausprägungen von Witterungsparametern und das Zuwachsverhalten der Bäume? Sind diese Beziehungen zeitlich stabil oder variabel?
- (c) Was lässt sich aus den Teilerkenntnissen in Bezug auf die Eignung der Trauben-Eiche für den zukünftigen Waldbau in Nordostdeutschland schlussfolgern?

– Stand des Wissens –

Der Begriff der Vitalität kann verschieden definiert werden. Zum einen wird darunter eine aktive Fähigkeit zur Ausnutzung gegebener und zur Erschließung neuer Ressourcen verstanden, andere Autoren bezeichnen damit das eher passive Vermögen eines Organismus, seine wesentlichen Lebensfunktionen auch bei Belastung aufrechtzuerhalten. Ähnlich differenziert werden auch die Begriffe Resilienz, Stabilität und Elastizität in Bezug auf Ökosysteme wie Waldbestände verwendet. Als Bezugsrahmen für diese Betrachtungen kann das Konzept der "Vulnerabilität" gesetzt werden. Es stellt der Wirkung ("Impakt") äußerer Einflüsse als Kombination von Sensitivität und Exposition die Anpassungsfähigkeit eines Systems gegenüber, um dessen tatsächliche Verletzlichkeit beziehungsweise Anfälligkeit zu beschreiben. Dieses Schema wird vor allem auf höheren Organisationsebenen angewandt und kann naturwissenschaftliche ebenso wie gesellschaftliche Zusammenhänge integrieren.

Die Vitalität eines Organismus lässt sich nicht direkt quantifizieren. Zu ihrer gutachtlichen Einschätzung bei Waldbäumen hat sich die Ansprache des prozentualen Laubverlusts im Sommerzustand etabliert, die europaweit nach gleichem Standard durchgeführt wird. Speziell für die Eiche ist außerdem ein Schema zur Beurteilung des Kronenzustands im Winter entwickelt worden, das die Verzweigungsstruktur, den Totastanteil und den Besatz mit Feinreisig anspricht und in acht Stufen einteilt.

Nach den jährlichen Waldzustandsansprachen auf Basis des Laubverlusts sind die Eichen seit zwei Jahrzehnten die am stärksten geschädigten Baumarten in Brandenburg. Gleichzeitig haben sichtbare Vitalitätseinbußen bis hin zum Absterben einzelner Bäume und zur Auflösung deutlich zugenommen. Die Ursachenforschung hat keine überall gleich dominierenden Schadfaktoren identifizieren können, sondern geht von einer komplexen Erkrankung unter Beteiligung abiotischer wie biotischer Ursachen aus. Als häufigste Gründe werden Witterungsextreme wie Dürreperioden und Starkfröste sowie der wiederholte Kahlfraß durch Insekten genannt, die vor allem in Kombination größere Schäden auslösen können.

Als aussagekräftiger Indikator für die Vitalität der Trauben-Eichen wird – trotz des grundsätzlichen "*growth or defense*"-Dilemmas für Waldbäume – die Zuwachsrate in Form der Jahrringbreite angesehen. Während ihr absolutes Maß Auskunft gibt über die Konkurrenz- und Standortverhältnisse, lassen die interannuellen Differenzen Rückschlüsse über die Einflüsse der Witterungsbedingungen zu. Für die Zeitreihen der Jahrringbreite und der Zuwachsrate ("Jahrringindex") können Eigenschaften wie Autokorrelation und Sensitivität sowie "Weiserjahre" mit auffällig einheitlichen Zuwachsänderungen hergeleitet und interpretiert werden. Zur Untersuchung der stochastischen Beziehungen zwischen Zuwachsraten und Witterungsvariablen sind eine Reihe dendroklimatologischer und dendroökologischer Verfahren entwickelt worden. Sie verwenden in der Regel entweder monatsweise oder tageweise aufgelöste Witterungsinformationen. Mit Hilfe geeigneter Algorithmen zur Modellbildung auf Basis der retrospektiv quantifizierten Beziehungen lassen sich, sofern geeignete Witterungs-Szenariodaten vorliegen, die Reaktionen der Jahrringbreitenbildung auf die mögliche klimatische Entwicklung der nächsten Jahrzehnte abschätzen.

– Material –

Die Basis der Untersuchungen sind zwei Versuchsflächen-Sets. Die *Kernflächen* K1-K5 umfassen fünf Mischbestände aus Trauben-Eichen und Kiefern (*Pinus sylvestris* L.) entlang eines West-Ost-Gradienten von Sachsen-Anhalt bis Ostpolen mit Baumaltern zwischen 110 und 150 Jahren, die auf Standorten mittlerer Nährkraft und durchschnittlicher Wasserversorgung stocken. Das standörtliche wie auch das Altersspektrum der bearbeiteten Flächen wird erweitert durch 20 *Zusatzflächen* im Osten bis Süden des Landes Brandenburg, die ebenfalls zum größten Teil in Mischbeständen mit Kiefer angelegt wurden.

Neben den ertragskundlichen Basisaufnahmen wurden auf den Versuchsflächen Bohrkerne an einer repräsentativen Stichprobe des herrschenden Bestandes entnommen (n = 20, zwei

Kerne je Baum). Auf den Kernflächen erfolgte die Probenahme auch im beherrschten Bestand. Zu allen Flächen liegen die Angaben der forstlichen Standortkartierung über die Nährkraftstufe und die Wasserversorgung vor. Die Zeitreihen der Witterungsdaten (Temperaturmittel und Niederschlagssummen) wurden vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) im Rahmen der Mitarbeit in den Verbundprojekten "OakChain" und "INKA BB" auf Basis von DWD-Daten bereitgestellt. Als Szenariodaten werden stationsbezogene Informationen aus dem Medianlauf des 2-Kelvin-Szenarios mit dem PIK-Regionalisierungsmodell STAR 2 auf Grundlage des SRES-A1B-Szenarios verwendet.

– Methoden –

Die Vitalität der Eichen wurde auf den Kernflächen nach zwei Verfahren angesprochen: Im Sommer erfolgte die Einschätzung des prozentualen Laubverlusts in fünf-Prozent-Stufen nach dem Standard der Waldzustandserhebung (EICHORN et al. 2005), im laublosen Zustand wurde das achtstufige Anspracheschema für die Kronenstruktur von Alteichen nach KÖRVER et al. (1999) angewandt. Entsprechend den methodischen Voraussetzungen waren unter- und zwischenständige Bäume von den Erhebungen ausgeschlossen. Ansprachen von Laubverlust und Kronenstruktur erfolgten auf den Kernflächen jährlich seit dem Spätwinter 2006, in die Auswertungen gingen die Daten der darauffolgenden fünf Jahre ein. Auf den Zusatzflächen erfolgte eine einmalige Aufnahme der Kronenstruktur zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme.

An den getrockneten und geschliffenen Bohrkernen wurden auf einem LINTAB-5-Messisch Früh- und Spätholzbreiten vermessen und anschließend zu Jahrringbreiten aggregiert. Bäume mit untypischen Wachstumsverläufen wurden aus den weiteren Analysen ausgeschlossen. Im Programmpaket "CLIMTREG" (BECK et al. 2013) erfolgten anschließend die Trendeliminierung mit Hilfe kubischer *Spline*-Funktionen und die AR(1)-Modellierung zur Entfernung autokorrelativer Effekte aus den resultierenden mittleren Jahrringindex-Zeitreihen je Baum. Aus den individuellen Zeitreihen des Jahrringindexes wurde die mittlere bestandesbezogene Index-Zeitreihe (= Chronologie) errechnet, auf den Kernflächen separat für herrschenden und beherrschten Bestand, auf den Zusatzflächen nur für den herrschenden Bestand. Die Zeitreihen der mittleren Jahrringbreite dienten zur flächenbezogenen Bestimmung der Parameter Autokorrelation und Sensitivität, die für die gesamte Zeitreihe sowie als gleitende Mittel über Intervalle von meist 21 Jahren berechnet wurden. Die Identifikation von Weiserjahren erfolgte anhand der Verteilungsparameter Mittelwert und Standardabweichung der Einzelbaum-Jahrringindizes pro Jahr.

Zur Quantifizierung der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen wurden die Analyse-Tools CLIMTREG sowie "bootRes" für R (ZANG & BIONDI 2012) verwendet, in die Daten der für die Flächen jeweils nächstliegenden Wetterstationen sowie die Zeitreihe des mittleren Jahrringindexes eingesteuert wurden. Das Paket `bootRes` ermöglicht die Berechnung von Korrelationskoeffizienten beziehungsweise *response-functions* zwischen Monatswerten von Temperatur und Niederschlag sowie dem Jahrringindex in festen Zeiträumen und in

gleitenden Zeitintervallen (*moving windows*). Die Signifikanzbeurteilung erfolgt auf Basis der 95-Prozent-Konfidenzintervalle bei der Bestimmung der Koeffizienten mit dem "bootstrapped"-Ansatz. CLIMTREG ermöglicht die tagesgenaue Identifikation der Perioden mit den jeweils stärksten Korrelationen zwischen dem Jahrringindex und Niederschlag beziehungsweise Temperatur. Die gefundenen Variablen werden einer Hauptkomponenten-Analyse mit anschließender Hauptkomponenten-Regression unterzogen. Daraus lässt sich ein Modell ableiten, das unter Verwendung von Szenariodaten zum Abschätzen der Witterungs-Zuwachs-Beziehungen in der Zukunft genutzt wird.

– Ergebnisse –

Mit Blick auf die eingangs gestellten Forschungsfragen lassen sich die gewonnenen Erkenntnisse wie folgt zusammenfassen:

(a) Kronenzustand und Zuwachs

Im Untersuchungszeitraum 2006-2011 haben sich der Belaubungsgrad und die Kronenstruktur für die Mehrzahl der untersuchten Bäume deutlich verbessert. Langfristige, mehrere Jahre übergreifende Einflüsse auf den Kronenzustand spiegeln sich eher in der Kronenstruktur, kurzfristige Einflüsse auf Jahresebene schlagen sich im Laubverlust nieder. Beide Parameter sind daher nicht stellvertretend füreinander zu verstehen, sondern ergänzen sich in ihrem Informationsgehalt. Zwischen den beiden Kronenzustandsparametern bestehen auf allen Kernflächen hochsignifikante Rangkorrelationen. Mit dem relativen Kreisflächenzuwachs ist die Kronenstruktur (hochsignifikant) über alle Kernflächen hinweg straffer positiv korreliert als der Laubverlust (nicht signifikant). Bei gleichem BHD sind größere Kronenflächen sowohl mit besseren Kronenstrukturwerten als auch mit einem geringeren Laubverlust gekoppelt.

Der jährliche Radialzuwachs nimmt im Mittel der Kernflächen seit mehreren Jahrzehnten zu, die Durchmesserentwicklung zeigt dementsprechend in der Regel einen konvexen bis linearen Verlauf. Im Mittel liegen die Radialzuwächse des herrschenden Bestandes in den letzten zehn Jahren leicht über dem Zuwachs des Grundflächenmittelstamms in der ersten Ertragsklasse nach ERTELD (1963). Auf den Zusatzflächen liegen die mittleren Jahrringbreiten etwa auf Ertragstafelniveau bei linearen bis konkaven Durchmesserkurven. Die absolut und relativ höchsten Zuwächse 2006-2011 zeigen die polnischen Kernflächen, in Deutschland ist K2 am wuchskräftigsten gewesen, während K1 und K3 etwas darunter bleiben.

(b) Beziehungen zwischen Witterungsparametern und Zuwachsverhalten

Hinsichtlich der Effekte jährlicher Witterungsdaten auf das Zuwachsverhalten sind allgemein die Korrelationen der Jahrringindizes (JRI) mit dem Niederschlag etwas straffer als mit der Temperatur, insgesamt aber nur selten signifikant. Der jahresbezogene Trocken-

heitsindex ist in ähnlicher Weise wie der Niederschlag mit dem JRI gekoppelt. Nur eine der untersuchten Zusatzflächen weist signifikante Korrelationen zur Niederschlagsbilanz und zum Trockenheitsindex auf, alle anderen Beziehungen sind statistisch rein zufällig. Korrelationen der Jahresmitteltemperaturen oder der Kontinentalitätsindizes mit der JRI-Zeitreihe sind in keinem Fall signifikant. Die für die Vegetationsperiode berechneten Korrelationskoeffizienten sind in keinem Fall höher als die für das Gesamtjahr ermittelten.

Die Prüfung der dendroklimatologischen Zusammenhänge auf Monatebene mit `bootRes` für die Kernflächen sowie fünf Zusatzflächen konzentrierte sich zum einen auf das von Zuwachs- wie von Witterungsinformationen gleichermaßen abgedeckte Zeitintervall (CIN) 1951-2006 als Ganzes. Außerdem wurden die erste und die zweite Hälfte des CIN getrennt analysiert. Die Flächen K1 und K3 zeigen ein ähnliches Bild bezüglich der Wirkung einzelner Monate: Höhere Jahrringindizes sind mit überdurchschnittlichen Niederschlägen vor allem in den Wintermonaten sowie im Spätsommer bis Frühherbst des Wuchsjahres gekoppelt. Auf den übrigen Kernflächen sind die Zusammenhänge im Vergleich weniger straff. Zwischen herrschendem und beherrschtem Bestand gibt es kaum Unterschiede in der Reaktion des Jahrringindex auf die monatsbezogenen Witterungsdaten. Die Beziehungen zu den Mitteltemperaturen sind etwas schwächer ausgeprägt, ergeben aber die gleiche Rangfolge in der Zuwachsrelevanz der Witterung. Auf allen Flächen sind vorrangig kühle Spätfrühlings- und Frühsommermonate mit überdurchschnittlichen Jahrringindizes verbunden, mit geringerer Signifikanz auch milde Dezember. Für die Zusatzflächen bestätigen sich die für die deutschen Kernflächen gefundenen Beziehungen.

Die komplementäre Wirkung von Temperatur und Niederschlag lässt sich bei paralleler Betrachtung erkennen: Während fast alle signifikanten Korrelationskoeffizienten für die Mitteltemperaturen negativ sind und in Frühjahrs- und Sommermonaten auftreten, ist ihr Vorzeichen im Fall der Niederschlagssummen bis auf wenige Ausnahmen positiv. Die getrennte Analyse der ersten und der zweiten Hälfte des CIN durch *moving windows* zeigt vor allem für K1 und K4, aber auch für K2 im Lauf der Zeit zunehmende signifikante Korrelationen zwischen Witterung und Jahrringindex. In Zusammenfassung aller Flächen ergeben sich für die zweite Untersuchungsperiode deutlich mehr signifikante Zusammenhänge als in der ersten, außerdem steigt der Anteil positiver Korrelationen mit dem Niederschlag und negativer Korrelationen mit der Temperatur.

Nach Auswertung der tagesaufgelösten Witterungs-Zuwachs-Beziehungen für das CIN mit CLIMTREG führen fast überall hohe Niederschläge bei niedrigen Temperaturen im Hochsommer des Vorjahres zu überdurchschnittlichen Zuwachsraten. Außerdem fördern erhöhte Niederschlagsmengen von Ende November bis in den Februar, zum Teil auch höhere Temperaturen, die Jahrringbildung. Das dritte auffällige Intervall ist die Zeit von Anfang April bis Mitte Juli mit höheren Zuwachsraten bei niedrigen Temperaturen und überdurchschnittlichen Niederschlägen. Die Modellierung von Jahrringindex-Zeitreihen für den Szenariozeitraum 2001-2055 auf Basis unterschiedlicher Kalibrierungszeiträume ergibt in den meisten Fällen die höchsten mittleren Jahrringindizes (JRI) für das mit der zweiten Hälfte

des CIN parametrisierte Modell. Die Kalibrierung mit dem CIN oder mit dessen erster Hälfte erzeugt überwiegend Schätzmodelle, die zu geringeren JRI und damit zu abnehmenden Jahrringbreiten führen.

Im Vergleich der unterschiedlichen Kalibrierungszeiträume verändern die von CLIMTREG identifizierten zuwachswirksamen Zeiträume in der Regel weder ihre Lage noch ihre Länge in wesentlichem Ausmaß. Auffällig ist jedoch, dass die Richtung der Zusammenhänge in der zweiten Hälfte des CIN uneinheitlicher wird. Neben die anfangs fast durchgängig negativen Wirkungen höherer Temperaturen und geringer Niederschläge auf die Zuwachsrate treten später auch positive Effekte dieser Merkmalsausprägungen.

(c) Schlussfolgerungen für die Zukunft der Trauben-Eiche in Nordostdeutschland

Vor dem Hintergrund des speziellen Fokus dieser Arbeit lässt sich eine Reihe von Risiken, aber auch von Chancen für die Zukunftsaussichten der Trauben-Eiche im Untersuchungsgebiet ableiten sowie Handlungsempfehlungen formulieren.

Zu den *Risiken* zählen die Teilergebnisse, die eine zunehmende Einflussstärke der externen Faktoren, im engeren Sinne der Witterungsvariablen, belegen. Dabei handelt es sich um die zunehmenden Hinweise der dendroklimatologischen Auswertungen auf eine steigende Einheitlichkeit und Stärke der Kopplung der Jahrringindex-Zeitreihen an die Witterungssignale. Die leicht abnehmende Autokorrelation, die als interne Pufferung exogener Effekte verstanden wird, könnte die wachsende Reaktivität verstärken. Die Klimaentwicklung nach dem verwendeten Szenario lässt häufigere und intensivere Belastungen der Bäume durch Trockenheit mit negativen Folgen für Zuwachs und Vitalität erwarten. Schwer einschätzbaren Kombinationswirkungen der Witterung mit anderen Schadfaktoren, vor allem mit phytophagen Insekten, steigern die Unsicherheit bezüglich der Anpassungskapazität der Bäume. Vitalitätseinbußen und Mortalität sind vor allem dort zu erwarten, wo die Baumart auf ungeeigneten Standorten angebaut und/oder waldbaulich so behandelt wurde, dass die Einzelbaumvitalität stark eingeschränkt ist. Unkalkulierbar bleiben nach allen Erwägungen die Gefahren drastisch veränderten Systemverhaltens nach *tipping points*, erhöhte Risiken durch Witterungsextreme sowie mögliche Schäden durch etablierte oder einwandernde biotische Schaderreger.

Die *Chancen* für die Trauben-Eiche werden unter anderem darin gesehen, dass in den Witterungs-Zuwachs-Beziehungen Anpassungsreaktionen an die sich ändernden äußeren Bedingungen nachgewiesen werden konnten. Die unveränderte Häufigkeit von Weiserjahren zeigt zusammen mit der im Mittel stabil gebliebenen Sensitivität in den Jahrringbreiten-Zeitreihen, dass trotz steigender Temperaturen im Untersuchungszeitraum die Reaktionen der Bäume im Wesentlichen gleich geblieben sind. In Verbindung mit der vergleichsweise schwachen Zuwachsreaktion der Bäume auf das Extremjahr 2003 und die Stabilisierung des Kronenzustands seit 2006 wird die Erwartung abgeleitet, dass die Anpassungsfähigkeit der Trauben-Eiche auch im Szenariozeitraum bis 2055 nicht dauerhaft überschritten wird. Ob-

wohl wie in der Vergangenheit einzelne Bäume und Bestände absterben werden, ist auch auf Grund der hohen genetischen Diversität der Baumart nicht davon auszugehen, dass ihr Anteil an der Waldfläche deutlich zurückgeht. Vor allem in den Regionen, wo die Versuchsbestände die schwächsten Kopplungen an Witterungseinflüsse zeigten, sowie auf Standorten mit besserer Bodenwasserverfügbarkeit kann von einer hohen Elastizität der Bäume ausgegangen werden.

Die *Handlungsoptionen* zum Stärken der Anpassungsfähigkeit umfassen im Wesentlichen die Steuerung der negativen und positiven Einflüsse, die dem menschlichen Einfluss zugänglich sind. Dazu gehört die Förderung der individuellen Vitalität und Elastizität durch optimal entwickelte Kronen und Wurzelsysteme. Die Mischung mit anderen Baumarten steigert die Bestandesstabilität, wobei die relative Konkurrenzschwäche der Eiche zu berücksichtigen ist. Verjüngungsmaßnahmen sollten auf die Erhaltung und Steigerung der genetischen Vielfalt ausgerichtet sein, Individuen mit überdurchschnittlicher Vitalität besonders fördern und die Einführung geeigneter Provenienzen unterstützen. Die Konkurrenz um Wasser kann – unter Beachtung des Risikos zusätzlicher Verdunstung – durch geringere Bestandesdichten reduziert werden. Die größten Erfolgsaussichten für diese waldbaulichen Aktivitäten bestehen auf Standorten höherer Wasserspeicherkapazität. Ein angepasstes Monitoring kann Bedrohungen zum Beispiel durch Insektenmassenvermehrungen rechtzeitig erkennen helfen, gegen die alle Bekämpfungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden sollten. Auf gesellschaftlicher Ebene sollte eine umfassende Diskussion zu den Zielen und Methoden der Waldbewirtschaftung geführt werden, um eine höhere Wertschätzung und Langfristigkeit gezielter Eichenförderung zu erreichen.

Zusammenfassend bestehen also Gründe nicht nur zur Sorge, sondern auch zum Optimismus hinsichtlich der Zukunftschancen für die Trauben-Eiche. Zu den Voraussetzungen für Zuversicht gehören ein standortgerechter, mischbestandsorientierter Waldbau mit dem Ziel optimaler Kronenentwicklung, ein kontinuierliches Waldmonitoring zur rechtzeitigen Feststellung und Eindämmung potenzieller Schäden sowie eine stabile gesellschaftliche Wertschätzung planmäßiger Waldbewirtschaftung. Unter diesen Voraussetzungen lässt sich aus der hier vorgelegten Bilanz von Risiken und Chancen durchaus ein Plädoyer für eine gleichbleibend starke Einbindung der Trauben-Eiche in den Wald der Zukunft ableiten.

Summary

– Objectives –

Sessile oak (*Quercus petraea* [MATT.] LIEBL.) is an ecologically as well as economically important tree species in the northeastern lowlands of Germany, especially in the regions where climate is more continental. The widespread introduction of the species into mature Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands as a means of ecological forest conversion has further enhanced its relevance in forest science and management. For a few decades, however, an increased number of trees and stands showing a severe decline in vitality has led to critical discussions on the possible role of oaks in today's forest development strategies. The adaptive capacity of Sessile oak will be further challenged by climate change conditions in the future. In this context, more information is needed on the relations between the vitality status and growth, including the development of these relations in the next decades.

The study investigates the dependencies between annual radial increment in *Quercus petraea* (measured as tree-ring width, TRW) and individual-tree vitality as well as the effects of climatic variables on TRW on different temporal scales. Retrospective analyses of the climate-growth system will be used to model the future behavior of trees under regional conditions, thus contributing to estimate more exactly the risks associated with the promotion of Sessile oak as one of the central species in forest conversion in Brandenburg. This central objective shall be accomplished by analyzing the following research questions:

- (a) Which results can be obtained by applying two different approaches to quantify individual crown vitality, and how are they related to the radial increment of trees?
- (b) Which relations may be determined between climatic variables and annual radial increment? Are these relations stable or do they change over time?
- (c) What is the outcome of the analyses with respect to the future role of Sessile oak in forest planning and management in northeastern Germany?

– State of knowledge –

The central term "vitality" can be defined in different ways. On the one hand, vitality is understood as the ability of an organism to actively utilize available resources and to expand its sphere of influence. On the other hand, it is seen as a rather passive capacity to maintain the basic life functions, even under stressful conditions. This ambiguity in definitions may also be observed in literature on other important ecological concepts such as resilience, stability, and elasticity of organisms and ecosystems. From a more general point of view, vulnerability analyses are increasingly applied as a conceptual framework to study the climate change effects on forest structure and functions. They compare the "impact" of external influences (as a result of sensitivity and exposition) to the adaptive capacity of a system in order to effectively assess the actual extent of its vulnerability. Additionally, this concept can integrate natural as well as cultural, social, and political influences.

The vitality of forest trees cannot be quantified directly but should rather be assessed by defined procedures and guidelines. The European standard procedure to evaluate crown transparency on Level-II-monitoring plots is used in this study as an approach to estimate vitality individually in oaks. The results of this approach are compared to those of an alternative method to classify crown structure based on branching patterns and the presence of twigs.

According to the annual assessments of crown condition, oaks have been the species with the highest degrees of crown transparency in Brandenburg throughout the past two decades. This has been accompanied by an unusually high level of severe defoliation, crown dieback, and individual mortality in some regions. The decrease in vitality has been attributed to the single or combined effects of abiotic (climatic extremes, site variables, water deficiency) and biotic factors (insect defoliation, pathogenic fungi)

The annual increment rate as expressed in the tree-ring width (TRW) is commonly regarded a reliable indicator of tree vitality. While absolute amounts of TRW mirror the individual site and competition status, inter-annual differences are indicators of climatic influences. Statistical properties such as auto-correlation and sensitivity may be computed for time series of TRW and tree-ring index (TRI). "Pointer years" with conspicuously high or low TRW in a large proportion of the sampled trees give further information on years with extreme climate conditions. To analyze the stochastic dependencies between TRI and climate, a wide range of dendroclimatic and dendroecological methods have been developed. These models use climatic data in either monthly or daily resolution. By extrapolating the historical climate-growth-relations as determined by retrospective analyses, they allow estimations of the reactions of TRW to scenario data under the influence of climate change.

– Material –

Investigations were carried out using two sets of trial plots. The *core plot* sequence K1-K5 comprises five mature mixed stands of Sessile oak with Scots pine along a gradient from Saxony-Anhalt to eastern Poland. The trees are 110-150 years old and grow under conditions characterized by sandy and partly podsollic cambisols with average water supply. To complement this sequence, a set of 20 *additional plots* was established in mixed oak-pine stands in Brandenburg on comparable sites as well as on more favorable and more detrimental soil types. Tree ages on these plots range from 35-160 years. In addition to the usual growth and yield data for the whole plot, increment cores were extracted from a representative sample of 20 dominant and 20 suppressed trees on each core plot and from 20 dominant trees on each additional plot. Time series data of local climate (daily mean temperatures and daily precipitation sum) were provided by the Potsdam-Institute for Climate Impact Research ("PIK") as part of their contribution to the research projects "OakChain" and "INKA BB". Data for the years 2007-2060 come from the median scenario of the regional climate model "STAR 2" which is based on the SRES-scenario A1B and assumes an increase in temperature of two Kelvin until 2060 (as compared to the 1961-1990 average).

– Methods –

Individual vitality was recorded on the core plots (i) according to the European standard method for the assessment of crown condition based on defoliation percentages in summer (EICHHORN et al. 2006) and (ii) following the approach proposed by KÖRVER et al. (1999) for crown structure classification in winter. Both methods were applied for all dominant and co-dominant oaks in the five subsequent years from 2006 to 2011. Oaks on the additional plots were assessed only once.

Two increment cores per tree were dried, mounted on wooden supports, and sanded to obtain smooth surfaces. The measuring table "LINTAB 5" was used to determine annual earlywood and latewood width values which were later added to obtain TRW time series. In the process of data preparation, trees with unusual DBH growth curves were excluded from further analysis. The program "CLIMTREG" (BECK et al. 2013) was applied to eliminate long-term trends in individual TRW series by means of cubic spline functions and to minimize auto-correlation within the resulting TRI time series. Plot-specific "chronologies" were calculated as the arithmetic mean of individual TRI time series, while mean TRW series served as a basis to determine auto-correlation and sensitivity values. These parameters were computed both for the complete time span covered by the TRW series and for moving 21 year intervals along this time span ("moving windows"). On the core plots, separate TRW parameters and separate chronologies were derived for the dominant as well as suppressed trees. Pointer years were identified on the basis of the mean and standard deviation of annual TRI distributions.

To analyze the relations between climate and growth, the programs CLIMTREG and "bootRes" for R (ZANG & BIONDI 2012) were applied. The algorithms combined climate data from stations located close to the respective plots and the chronologies as determined by CLIMTREG. The bootRes package calculates correlation coefficients as well as response functions between monthly temperature (or precipitation) and TRI values in fixed time spans or, alternatively, in moving windows. Statistical significance is estimated on the basis of the 95-%-confidence intervals resulting from the "bootstrapped" determination of the respective coefficients. CLIMTREG was applied to identify the exact periods exhibiting the strongest correlations between TRI and daily precipitation or temperature. The program achieves this by total enumeration of all possible periods ranging in length from 21 days to 183 days in the period from July 1 in the previous year to October 31 in the current year. The variables found by this method were processed in Primary Component Analyses (PCA) with subsequent Primary Component Regressions (PCR) to obtain a model which allows estimations to study the behavior of the trees under climatic conditions according to the local scenario.

– Results –

Regarding the research questions formulated above, the results of the various investigations may be summarized as follows:

(a) Crown condition and growth

During the investigation interval 2006-2011, crown condition as expressed in summer foliage as well as in crown structure has improved considerably. While long-term influences on crown condition which span several years are mirrored in the crown structure, defoliation percentages represent mostly short-term effects on the annual level. Therefore, the results of the different assessment methods cannot be seen as representative of each other, but rather as complementary information on different aspects of individual vitality. Positive rank correlation coefficients between the two parameters are statistically significant on all core plots. Crown structure values are correlated more closely to individual basal area increment than defoliation percentages. At the same DBH, trees with larger crowns have a significantly better crown structure and less defoliation.

Annual radial increment has been increasing on the core plots over the past decades, resulting in linear to convex DBH curves. The increment level of the dominant trees is on average slightly higher than that of the first yield class in the table for oak by ERTELD (1963). On the additional plots, mean TRW is more or less comparable to yield table values but shows a slowly decreasing trend in a number of stands. The two core plots located in Poland exhibited the highest radial increments 2006-2011, both absolutely and relatively. Regarding the plots in Germany, increments were higher on K2 (southern Brandenburg) in comparison to K1 and K3.

(b) Climate-growth relations

On the annual level, TRI time series are correlated more closely to precipitation sums than to annual mean temperatures. The relations between annual values of the drought index after DE MARTONNE (1926) and TRI show the same pattern as those between TRI and precipitation sums. Except for one of the additional plots, the respective correlation coefficients are statistically insignificant. Correlations did not increase when designated climate parameters were calculated exclusively for the vegetation period instead of the whole year.

Dendroclimatological relations on the monthly scale were analyzed with `bootRes` (i) for the common interval ("CIN") covered by both climate and increment data (1951-2006) and (ii) for the first and the second half of this interval separately. Trees on the core plots K1 and K3 respond almost similarly to climatic influences: High TRI values are related to above-average precipitation mainly during the winter months, as well as in late summer and early fall of the year of growth. On the other core plots, the dependencies are less clear but indicate a similar importance of precipitation in July, August, and December of the year prior to growth. The relations of TRI to monthly temperature are weaker than those to pre-

precipitation with the same ranking of plots regarding their sensitivity. The most favorable influence on TRI is exerted by the cool spring to early summer months in the year of growth as well as the less significant above-average temperatures in December. Correlation patterns are very similar for both dominant and suppressed trees. The additional plots support the general findings of the German core plots.

The complementary effects of temperature and precipitation are expressed in the opposite direction of their correlations with TRI in certain months: while most of the temperature coefficients were significantly positive for the spring and summer months, nearly all precipitation coefficients are negative. Separate analyses of the first and the last half of the CIN show that the strength of correlations between TRI and climatic variables has been increasing over the past decades. This is evident especially for K1 and K4, but also for K2. When summarized over all plots, there were distinctly more significant correlation coefficients in the period between 1984-2006 than that of the period between 1951-1983. Additionally, the percentages of negative coefficients for temperature and positive coefficients for precipitation have increased when comparing the first and second periods.

According to analysis of the relations of TRI to climate data in daily resolution with CLIMTREG, high summer precipitation in the preceding year clearly promotes above-average TRI values. Another conspicuous climate-influenced time period ranges from late November to February with positive correlations both to precipitation and to temperature (at least partly). The third important period for TRI in most trees on the core plots starts in early April and lasts until Mid-July. During this time, high TRI values are correlated with low temperatures and high precipitation.

The behavior of the climate-growth system under future conditions was estimated by models for TRI development generated in CLIMTREG on the basis of different calibration periods. In reference to most of the considered plots, the average TRI is higher if the second half of the CIN is used for calibration rather than the entire CIN (or its first half). The results of the different models (or rather, of the different calibration periods) do not differ very much in terms of the identified variables (i.e. length of influential period and type of climatic parameter). However, the direction of correlations becomes more variable in the last half of the CIN, indicating changing relations between growth and climate.

(c) Conclusions for the future of Sessile oak in northeastern Germany

The results of this study may be summarized in a number of risks, but also of opportunities regarding future vitality and growth of Sessile oak under regional conditions. Finally, there are some options that can be recommended for the silvicultural management of the species.

The *risks* are related to those findings that point towards an increasing influence of external influences or rather climatic variables on tree growth. This increase is visible for example in the higher number of significant correlation coefficients calculated between monthly climate and TRI in the decades close to the present, compared to the decades following the

middle of the past century. The decrease in average auto-correlation within TRW time series is another indicator of this development. STAR 2 as well as other regional climate models predict more frequent and more intense drought periods in northeastern Germany. With respect to these scenarios, the positive correlations between TRI and precipitation identified by the applied dendroclimatological methods suggest a higher risk of severe drought stress in the future. This could negatively affect both the vitality and growth of trees.

The complex interactions of climatic extremes with other stress factors such as insects or pathogenic fungi make it difficult to estimate the extent of adaptive capacity on the individual, forest stand, or species level. Weak vitality and increased mortality rate can be expected especially on dry and poor sites or in dense stands with small crowns that are detrimental to individual vitality. Risks that cannot be calculated result from (i) unpredictable behavior of the climatic system after so-called "tipping points" have been passed; (ii) extreme climatic events such as storms, fires, or unprecedented drought stress; or (iii) damages caused by invasive species or established species that benefit greatly from climate change.

Opportunities for Sessile oak can be seen in the adaptive processes that were detected in the climate-growth relations by means of CLIMTREG analysis. Additionally, the more or less constant number and intensity of pointer years in the stands, along with the stable degree of sensitivity in TRW time series, support the assumption that despite rising temperatures, tree growth has remained basically unchanged. Most trees did not show any severe reaction to the extreme drought situation in the summer of 2003. The improvement of crown condition on all core plots after 2006, the high genetic diversity of the species in general and of the trees on the core plots, as well as the weak reaction to 2003 combined suggest a strong adaptive capacity that will not be exceeded permanently until the end of the scenario period (2060). Although individual trees may continue to suffer and die off on a local scale, the probability of a rapid increase in trees with decline symptoms is considered very low. A high elasticity of the species can be expected especially in regions where chronologies show minor correlations to climate parameters and on sites with above-average water availability.

Management *options* to support Sessile oak vitality and growth consist basically in promoting favorable conditions and limiting negative influences. A large crown with dense foliage and a well-developed root system are crucial conditions for individual vitality which should be strengthened by suitable silvicultural strategies as in reducing stand densities at an early age. Mixed stands have a higher stability towards disturbances and provide more diverse habitats for natural antagonists against defoliators. The relatively weak competitiveness of oaks should be taken into account when advocating mixed stands. Regeneration activities should enhance genetic diversity, promote phenotypes with above-average vitality, and accelerate the adaptation of the species by "assisted migration" of drought-tolerant provenances. Competition for water may be eased by lower stand densities. However, the canopy should be kept sufficiently closed to prevent an excessive growth of ground vegetation. An adapted system to monitor forest growth and vitality should support the proposed manage-

ment of the species. This could be used to technically assist the natural capacities of the species in counteracting major insect outbreaks and other severe biotic risks as early as possible.

In conclusion, there are not only reasons to worry, but also reasons for optimism regarding the future of *Quercus petraea* in the study region. A silvicultural regime following the overall objective of high individual and stand vitality, management techniques that reflect the specific site conditions, a suitable forest monitoring system, and a large proportion of mixed stands with rich structural diversity are important preconditions for the successful development of the species. At the same time, a thorough discussion between all stakeholders, interest groups, and the public is needed on the social and political role of forests and the required level of management. This should lead to a stable appreciation of forestry providing the resources and staff necessary to cope with the consequences of climate change which should not only be limited to northeastern Germany.

7 Literatur

- AAS, G. (2006): *Quercus robur* L. In: P. Schütt, H. Weisgerber, H. J. Schuck, U. Lang, B. Stimm und A. Roloff (Hg.): Enzyklopädie der Laubbäume. Hamburg: Nikol Verlag: 485–498.
- ABRAMS, M. D.; RUFFNER, M. C.; MORGAN, T. A. (1998): Tree-ring responses to drought across species and contrasting sites in the ridge and valley of central Pennsylvania. *Forest Science* 44: 550–558.
- ADAMS, H. D.; GUARDIOLA-CLARAMONTE, M.; BARRON-GAFFORD, G. A.; VILLEGAS, J. C.; BRESHEARS, D. D.; ZOU, C. B.; TROCH, P. A.; HUXMAN, T. E. (2009): Temperature sensitivity of drought-induced tree mortality portends increased regional die-off under global-change-type drought. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106 (17): 7063–7066.
- ADGER, W. N. (2006): Vulnerability. *Global Environmental Change* 16 (8): 268–281.
- ADGER, W. N.; HUGHES, T. P.; FOLKE, C.; CARPENTER, S. R.; ROCKSTRÖM, J. (2005): Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters. *Science* 309: 1036–1039.
- AKAIKE, H. (1974): A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 19 (4): 716–723.
- ALLEN, C. D.; MACALADY, A. K.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; MCDOWELL, N.; VENNETIER, M.; KITZBERGER, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D. D.; HOGG, E. H.; GONZALEZ, P.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; CASTRO, J.; DEMIDOVA, N.; LIM, J. H.; ALLARD, G.; RUNNING, S.; SEMERCI, A.; COBB, N. (2010): A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259 (4): 660–684.
- ALTENKIRCH, W.; MAJUNKE, C.; OHNESORGE, B. (2002): *Waldschutz auf ökologischer Grundlage*. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- ALTHERR, E.; UNFRIED, P.; HRADETZKY, J.; HRADETZKY, V. (1975): Statistische Rindenbeziehungen als Hilfsmittel zur Ausformung und Aufmessung unentrindeten Stammholzes. Teil II: Lärchen, Schwarzkiefer, Stiel-, Trauben- und Rot-Eiche, Bergahorn und Linde. FVA Baden-Württemberg. Freiburg (Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg).
- AMMER, C. (2008): Konkurrenzsteuerung - Anmerkungen zu einer Kernaufgabe des Waldbaus beim Aufbau vielfältiger Wälder. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Biodiversität - Lebensversicherung des Waldes. Tagungsband zur gemeinsamen Jahrestagung des MLUV und des Brandenburgischen Forstvereins e.V. in Rangsdorf. Eberswalde (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 36): 21–26.
- ANGELER, D. G.; TRIGAL, C.; DRAKARE, S.; JOHNSON, R. K.; GOEDKOOP, W. (2010): Identifying resilience mechanisms to recurrent ecosystem perturbations. *Oecologia* (164): 231–241.
- AREND, M.; KUSTER, T.; GÜNTHARDT-GOERG, M. S.; DOBBERTIN, M. (2011): Provenance-specific growth responses to drought and air warming in three European oak species (*Quercus robur*, *Q. petraea* and *Q. pubescens*). *Tree Physiology* 31 (3): 287–297.
- AREND, M.; BREM, A.; KUSTER, T. M.; GÜNTHARDT-GOERG, M. S. (2012): Seasonal photosynthetic responses of European oaks to drought and elevated daytime temperature. *Plant Biology*.
- BACHMANN, M. (1998): Indizes zur Erfassung der Konkurrenz von Einzelbäumen. Methodische Untersuchungen in Bergmischwäldern. Forstliche Forschungsberichte München. Forstliche Forschungsberichte München (171).
- BADEAU, V.; BECKER, M.; BERT, D.; DUPOUEY, J.-L.; LEBOURGEOIS, F.; PICARD, J.-F. (1996): Long-Term Growth Trends of Trees: Ten Years of Dendrochronological Studies in France. In: H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl und J.P. Skovsgaard (Hg.): Growth Trends in European Forests. Berlin, Heidelberg: Springer (EFI Research Reports, 5).
- BALTHASAR, H. (1869): Ueber das Verhalten der Eiche als Waldrechter. *Zeitschrift für Forst- und Jagdwesen* 1: 84–96.
- BASCIETTO, M.; CHERUBINI, P.; SCARASCIA-MUGNOZZA, G. (2004): Tree rings from a European beech forest chronosequence are useful for detecting growth trends and carbon sequestration. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 481–492.
- BÄUCKER, E.; BUES, C.-T. (2009): Holzqualität von Traubeneichen-Kiefern-Mischbeständen und Traubeneichen-Reinbeständen. *Forst und Holz* 64 (3): 25–29.
- BÄUCKER, E.; LÖFFLER, S.; BUES, C.-T.; SCHRÖDER, J. (2010): Bedeutung von Rindennekrosen an Traubeneichen (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) in Brandenburg für die Holzverwertung. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 44 (4): 145–156.
- BAUM, C. (2006): Feinwurzeluntersuchungen an Eichen im Land Brandenburg. Zustand der Ektomykorrhizierung in geschädigten Eichen-Beständen (Bericht zum Werkvertrag). Landesforstanstalt Eberswalde / Sanitz.

- BAUMUNG, G. (2010): Röntgendensitometrische Untersuchungen an Traubeneiche (*Quercus petraea*) zur Erfassung und Bewertung dendroökologisch relevanter, intraannueller Jahrringparameter. Diplomarbeit. TU Dresden, Dresden/Tharandt. Institut für Forstnutzung und Forsttechnik.
- BAZZAZ, F. A.; CHIARIELLO, N. R.; COLEY, P. D.; PITELKA, L. F. (1987): Allocating resources to reproduction and defense. *BioScience* 37: 58–67.
- BECK, W. (2004): Wirkung der Witterung auf Wachstum und Vitalität von Waldbäumen und Waldbeständen. In: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (Hg.): Auswirkung der Trockenheit 2003 auf Waldzustand und Waldbau. Arbeitsbericht des Instituts für Forstökologie und Walderfassung 2/2004. Eberswalde/Hamburg: 36–56.
- BECK, W. (2007): Finding best regression approach for description of climate-growth relationships by floating time spans of varying widths. In: K. Haneca, A. Verheyden, H. Beeckmann, H. Gärtner, G. Helle und G. H. Schleser (Hg.): TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Vol. 5: Proceedings of the Dendrosymposium April 20th-22nd 2006, Tervuren, Belgium. Jülich: FZJ Zentralbibliothek/Verlag (Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, 74): 44–53.
- BECK, W. (2009): Growth patterns of forest stands - the response towards pollutants and climatic impact. *iForest* 2: 4–6.
- BECK, W. (2010): Auswirkungen von Trockenheit und Hitze auf den Waldzustand in Deutschland - waldwachstumskundliche Ergebnisse der Studie im Auftrag des BMELV. In: J. Nagel (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung. Körbecke: 56–65.
- BECK, W.; SANDERS, T. G. M.; POFAHL, U. (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 review. *Dendrochronologia* 31.
- BECKER, B.; GLASER, R. (1991): Baumringsignaturen und Wetteranomalien (Eichenbestand Guttenberger Forst, Klimastation Würzburg). *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 110 (1): 66–83.
- BECKER, M.; NIEMINEN, T. M.; GÉRÉMIA, F. (1994): Short-term variations and long-term changes in oak productivity in northeastern France. The role of climate and atmospheric CO₂. *Annals of Forest Science* 51: 477–492.
- BEGON, M.; HARPER, J. L.; TOWNSEND, C. R. (1990): Ökologie: Individuen, Populationen und Lebensgemeinschaften. Basel: Birkhäuser.
- BEHRINGER, W. (2010): Kulturgeschichte des Klimas. Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung. 5., aktualisierte Aufl. München: Beck.
- BERGER, U.; HILDENBRANDT, H.; GRIMM, V. (2004): Age-related decline in forest production: modelling the effects of growth limitation, neighbourhood competition and self-thinning. *Journal of Ecology* 92: 846–853.
- BERGÈS, L.; BALANDIER, P. (2010): Revisiting the use of soil water budget assessment to predict site productivity of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in the perspective of climate change. *European Journal of Forest Research* 129: 199–208.
- BERGÈS, L.; CHEVALIER, R.; DUMAS, Y.; FRANC, A.; GILBERT, J. M. (2005): Sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) site index variation in relation to climate, topography and soil in even-aged high-forest stands in northern France. *Annals of Forest Science* 62: 391–402.
- BERGÈS, L.; DUPOUEY, J.-L.; FRANC, A. (2000): Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* Liebl. in northern France since the middle of the nineteenth century. *Trees* 14 (7): 398–408.
- BERGÈS, L.; NEPVEU, G.; FRANC, A. (2008): Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management* 255: 567–579.
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. (1992): A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. *Forest Science* 38: 695–720.
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. (1995): Evaluation of competition indices in individual tree growth models. *Forest Science* 41: 360–377.
- BIGLER, C.; BRÄKER, O.; BUGMANN, H.; DOBBERTIN, M.; RIGLING, A. (2006): Drought as an Inciting Mortality Factor in Scots Pine Stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330–343.
- BIJAK, S. (2008): Various factors influencing the pointer year analysis. In: D. Elferts, G. Brumelis, H. Gärtner, G. Helle und G. Schleser (Hg.): TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, Vol. 6. Proceedings of the Dendrosymposium 2007, May 3rd – 6th 2007, Riga, Latvia: 77–82.
- BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BARNARD, H. R. (2002): Age-related Decline in Forest Ecosystem Growth: An Individual-Tree, Stand-Structure Hypothesis. *Ecosystems* 5: 58–67.
- BIONDI, F.; WAIKUL, K. (2004): DENDROCLIM2002: A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30: 303–311.

- BLATT, J.; KREFT, S.; STRIXNER, L.; LUTHARDT, V.; IBISCH, P. L. (2010): Glossar Klimaplastischer Naturschutz. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde. Eberswalde. Online verfügbar unter <http://www.hnee.de/Projekte-aktuell/INKA-BB/Teilprojekte-an-der-HNE-Eberswalde/Anpassung-Naturschutz-TP-16/Glossar-Klimaplastischer-Naturschutz/Glossar-Klimaplastischer-Naturschutz-E5214.htm>, zuletzt geprüft am 22.01.2013.
- BOISVENUE, C.; RUNNING, S. W. (2006): Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12: 862–882.
- BOLTE, A.; CZAJKOWSKI, T.; KOMPA, T. (2007): The north-eastern distribution range of European beech - a review. *Forestry* 80 (4): 413–429.
- BOLTE, A.; IBISCH, P. (2007): Neun Thesen zu Klimawandel, Waldbau und Waldnaturschutz. *AFZ – Der Wald* 62 (11): 572–576
- BOLTE, A.; IBISCH, P.; MENZEL, A.; ROTHE, A. (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. Anpassung der Wälder an den Klimawandel. *AFZ – Der Wald* 63 (15): 800–803.
- BOLTE, A.; AMMER, C.; LÖF, M.; MADSEN, P.; NABUURS, G.-J.; SCHALL, P.; SPATHELF, P.; ROCK, J. (2009): Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24 (6): 473–482.
- BOLTE, A.; DEGEN, B. (2010): Anpassung der Wälder an den Klimawandel: Optionen und Grenzen. *Landbauforschung* 60 (3): 111–118.
- BOLTE, A.; HILBRIG, L.; GRUNDMANN, B. M.; KAMPF, F.; BRUNET, J.; ROLOFF, A. (2010): Climate change impacts on stand structure and competitive interactions in a southern Swedish spruce–beech forest. *European Journal of Forest Research* 129: 261–276.
- BONN, S. (1998): Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen/Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. Dresden: Selbstverlag der TU Dresden (Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt/Contributions to Forest Sciences).
- BONN, S. (2000): Konkurrenzdynamik in Buchen/Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 171 (5/6): 81–88.
- BRAUN, H. J. (1982): Lehrbuch der Forstbotanik. München: Elsevier.
- BRÉDA, N.; COCHARD, H.; DREYER, E.; GRANIER, A. (1993): Water transfer in a mature oak stand (*Quercus petraea*): seasonal evolution and effects of a severe drought. *Canadian Journal of Forest Research* 23 (6): 1136–1143.
- BRÉDA, N.; GRANIER, A. (1996): Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Annals of Forest Science* 53 (2-3): 521–536.
- BRÉDA, N.; HUC, R.; GRANIER, A.; DREYER, E. (2006): Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science* 63: 625–644.
- BRESHEARS, D. D.; LÓPEZ-HOFFMAN, L.; GRAUMLICH, L. (2011): When Ecosystem Services Crash: Preparing for Big, Fast, Patchy Climate Change. *Ambio* 40 (3): 256–263.
- BRESSEM, U.; STEEN, A. VON (2012): Eichensterben - Erkrankungsschub 2011. *AFZ – Der Wald* 67 (17): 24–27.
- BRIFFA, K.; COOK, E. (1990): Methods of Response Function Analysis. In: E. R. Cook und L. A. Kairiukstis (Hg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.: 240–247.
- BRIFFA, K.; JONES, P. D. (1990): Basic chronology assessment and statistics. In: E. R. Cook und L. A. Kairiukstis (Hg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.: 137–152.
- BRIFFA, K. R.; SCHWEINGRUBER, F. H.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; SHIYATOV, S. G.; VAGANOV, E. A. (1998): Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature* 391: 678–682.
- BRIFFA, K. R.; OSBORN, T. J.; SCHWEINGRUBER, F. H.; JONES, P. D.; SHIYATOV, S. G.; VAGANOV, E. A. (2002): Tree-ring width and density data around the Northern Hemisphere: Part 1, local and regional climate signals. *The Holocene* 12: 737–757.
- BUES, C.-T.; BÄUCKER, E.; FLÖTHMANN, U. (1999): Untersuchung der zellulären Holzbildung unter Trockenstress gewachsener Fichten mit Hilfe einer neuartigen, besonders baumschonenden Mikroprobenmethode. *Wissenschaftliche Zeitschrift der TU Dresden* 48 (2): 3–8.
- BÜNTGEN, U.; ESPER, J.; FRANK, D. (2008): Wie reagieren Bäume auf Klimaveränderung? Ergebnisse dendroklimatologischer Untersuchungen. *Jahrbuch der Baumpflege*: 26–39.
- BURSCHEL, P.; HUSS, J. (1997): Grundriß des Waldbaus. Ein Leitfaden für Studium und Praxis. 2. Aufl. Berlin: Parey.

- BUSCHBOM, J.; GIMMERTHAL, S.; KIRSCHNER, P.; MICHALCZYK, I. M.; SEBBENN, A.; SCHUELER, S.; HENKE SCHLÜNZEN, K.; DEGEN, B. (2012): Spatial composition of pollen-mediated gene flow in sessile oak. *Forstarchiv* 83 (1): 12–18.
- BUTTER, D. (2001): 10 Jahre Waldumbau in Sachsen. *AFZ – Der Wald* 56 (19): 995–997.
- CALDWELL, M. M.; DAWSON, T. E.; RICHARDS, J. H. (1998): Hydraulic lift: consequences of water efflux from the roots of plants. *Oecologia* 113: 151–161.
- CANADELL, J. G.; RAUPACH, M. R. (2008): Managing Forests for Climate Change Mitigation. *Science* 320: 1456–1457.
- CANNELL, M. G. R.; GRACE, J. (1993): Competition for light: detection, measurement, and quantification. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1969–1979.
- CARRER, M. (2011): Individualistic and Time-Varying Tree-Ring Growth to Climate Sensitivity. *PLoS ONE* 6 (7): e22813.
- CHOAT, B.; JANSEN, S.; BRODRIBB, T. J.; COCHARD, H.; DELZON, S.; BHASKAR, R.; BUCCI, S. J.; FEILD, T. S.; GLEASON, S. M.; HACKE, U. G.; JACOBSEN, A. L.; LENS, F.; MAHERALI, H.; MARTÍNEZ-VILALTA, J.; MAYR, S.; MENCUCCINI, M.; MITCHELL, P. J.; NARDINI, A.; PITTERMANN, J.; PRATT, R. B.; SPERRY, J. S.; WESTOBY, M.; WRIGHT, I. J.; ZANNE, A. E. (2012): Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491 (7426): 752–755.
- CIAIS, PH; REICHSTEIN, M.; VIOVY, N. ET AL (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437 (7058): 529–533.
- COCHARD, H.; BRÉDA, N.; GRANIER, A.; AUSSÉNAC, G. (1992): Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl., *Q. pubescens* Willd., *Q. robur* L.). *Annals of Forest Science* 49 (3): 225–233.
- CONRADI, C.; ENGELMANN, U.; HENDTKE, H.; LEBUS, W.; NÖSEL, U.; OLDORFF, S. (2004): Eiche - Verjüngung, Pflege und Nutzung. In: MLUR - Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (Hg.): *Waldbau-Richtlinie 2004 "Grüner Ordner" der Landesforstverwaltung Brandenburg*. Berlin: vierC digitalprint: 40–59.
- COOK, E. R. (1990): A Conceptual Linear Aggregate Model for Tree Rings. In: E. R. Cook und L. A. Kairiukstis (Hg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.: 98–104.
- Cook, E. R.; Kairiukstis, L. A. (Hg.) (1990): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.
- COOK, E. R.; PEDERSON, N. (2011): Uncertainty, Emergence, and Statistics in Dendrochronology. In: M. K. Hughes, T. W. Swetnam und H. F. Diaz (Hg.): *Dendroclimatology. Progress and Prospects*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer (Developments in Paleoenvironmental Research, 11): 77–112.
- COOK, E. R.; PETERS, K. (1981): The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin* 41: 45–53.
- CRAWLEY, M. J. (2007): *The R book*. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- CUFAR, K.; LUIS, M. DE; ECKSTEIN, D.; KAJFEZ-BOGATAJ, L. (2008): Reconstructing dry and wet summers in SE Slovenia from oak tree-ring series. *International Journal of Biometeorology* 52: 607–615.
- CZAJKOWSKI, T.; KOMPA, T.; BOLTE, A. (2006): Zur Verbreitungsgrenze der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. *Forstarchiv* 77: 203–216.
- D'AMATO, A. W.; PUETTSMANN, K. J. (2004): The relative dominance hypothesis explains interaction dynamics in mixed species *Alnus rubra* *Pseudotsuga menziesii* stands. *Journal of Ecology* 92: 450–463.
- D'ARRIGO, R.; WILSON, R.; LIEPERT, B.; CHERUBINI, P. (2008): On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change* 60: 289–305.
- DELANGE, H. J.; SALA, S.; VIGHI, M.; FABER, J. H. (2010): Ecological vulnerability in risk assessment — A review and perspectives. *Science of the Total Environment* 408: 3871–3879.
- DELUCIA, E. H.; CASTEEL, C. L.; NABITY, P. D.; O'NEILL, B. F. (2008): Insects take a bigger bite out of plants in a warmer, higher carbon dioxide world. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105 (6): 1781–1782.
- DESPREZ-LOUSTAU, M. L.; MARCAIS, B.; NAGELEISEN, L. M.; PIOUS, D.; VANNINI, A. (2006): Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Annals of Forest Science* 64: 597–612.
- DHOTE, J. -F; HERVÉ, J. -C (2001): Assessing Long-Term Changes in Stand Productivity: a Case Study of Sessile Oak High Forests. In: J.-M. Carnus, R. Dewar, D. Lousteau, M. Tomé und C. Orazio (Hg.): *Models for the Sustainable Management of Temperate Plantation Forests*. Joensuu (EFI Proceedings, 41): 105–117.
- DICKSON, R. E.; TOMLINSON, P. T. (1996): Oak growth, development and carbon metabolism in response to water stress. *Annals of Forest Science* 53 (2-3): 181–196.

- DITTMAR, C.; ELLING, W. (1999): Jahrringbreite von Fichte und Buche in Abhängigkeit von Witterung und Höhenlage. Radial growth of Norway spruce und European beech in relation to weather and altitude. Forstwissenschaftliches Centralblatt 118: 251–270.
- DITTMAR, C.; ZECH, W.; ELLING, W. (2003): Growth variations of Common beech (*Fagus sylvatica* L.) under different climatic and environmental conditions in Europe - a dendroecological study. Forest Ecology and Management 173: 63–78.
- DOBBERTIN, M. (2005): Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. European Journal of Forest Research 124 (4): 319–333.
- DOBBERTIN, M.; GIUGGIOLA, A. (2006): Baumwachstum und erhöhte Temperaturen. In: T. Wohlgemuth (Hg.): Wald und Klimawandel. Birmensdorf (Forum für Wissen): 35–45.
- DOBBERTIN, M.; WERMELINGER, B.; BIGLER, C.; BÜRGI, M.; CARRON, M.; FORSTER, B.; GIMMI, U.; RIGLING, A. (2007): Linking Increasing Drought Stress to Scots Pine Mortality and Bark Beetle Infestations. The Scientific World Journal 7 (S1): 231–239.
- DOBROWOLSKA, D. (2008): Effect of stand density on oak regeneration in flood plain forests in Lower Silesia, Poland. Forestry 81 (4): 511–523.
- DONAUBAUER, E. (1998): Die Bedeutung von Krankheitserregern beim gegenwärtigen Eichensterben in Europa - eine Literaturübersicht. European Journal of Forest Pathology 28: 91–98.
- Dong, P. H. (Hg.) (2007): Eiche im Pfälzerwald. Trippstadt (Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz).
- DRISCOLL, D. M.; FONG, J. M. Y. (1992): Continentality: A basic climatic parameter re-examined. International Journal of Climatology 12 (2): 185–192.
- DROBYSHEV, I.; LINDERSON, H.; SONESSON, K. (2007): Relationship between Crown Condition and Tree Diameter Growth in Southern Swedish Oaks. Environmental Modeling and Assessment (128): 61–73.
- DUDA, H. A. A. (2006): Vergleich forstlicher Managementstrategien. Umsetzung verschiedener Waldbaukonzepte in einem Waldwachstumssimulator. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.
- ECKSTEIN, D.; SCHMIDT, B. (1974): Dendroklimatologische Untersuchungen an Stieleichen aus dem maritimen Klimagebiet Schleswig-Holsteins. Angewandte Botanik 48: 371–383.
- EICHHORN, J.; ICKE, R.; ISENBERG, A.; PAAR, U.; SCHÖNFELDER, E. (2005): Temporal development of crown condition of beech and oak as a response variable for integrated evaluations. European Journal of Forest Research 124 (4): 335–347.
- EICHHORN, J.; SZEPESI, A.; FERRETTI, M.; DURRANT, D.; ROSKAMS, P. (2006): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Part II: Visual Assessment of Crown Condition. Hamburg.
- EILMANN, B.; WEBER, P.; RIGLING, A.; ECKSTEIN, D. (2006): Growth reactions of *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. to drought years at a xeric site in Valais, Switzerland. Dendrochronologia 23 (3): 121–132.
- EISENHAUER, D. R. (1989): Untersuchungen zur Entwicklung der ökologischen Stabilität von Eichenbeständen im nordöstlichen Harzvorland. Beiträge für die Forstwirtschaft 23 (2): 55–62.
- EISENHAUER, D. R. (1991): Eichensterben. Symptome und Ansprache des Schädigungsgrades bei Traubeneiche und Stieleiche. Der Wald 41 (7): 234–236.
- EISENHAUER, D. R. (2010): Einfluss der Vitalitätsentwicklung der Traubeneiche (1982–2002) auf die Waldstruktur des Dictamno-Sorbion. Unveröffentlichter Forschungsbericht. Staatsbetrieb Sachsenforst. Dresden/Graupa.
- ELLING, W.; DITTMAR, C. (2003): Neuartige Zuwachsdepressionen bei Buchen. AFZ - DerWald 58 (1): 42–45.
- ELLNER, B. (2010): Analyse der Vulnerabilität von Wald-Biotoptypen gegenüber dem Klimawandel am Beispiel des Nationalparks Unteres Odertal. Masterarbeit. Hochschule für nachhaltige Entwicklung, Eberswalde.
- ELMER, M.; KÄTZEL, R.; BENS, O.; BUES, C. -T.; SONNTAG, H.; HÜTTL, R. F. (Hg.) (2009): Nachhaltige Bewirtschaftung von Eichen-Kiefern-Mischbeständen. München: oekom.
- ERIKSSON, L. O.; BACKÉUS, S.; GARCIA, F. (2012): Implications of growth uncertainties associated with climate change for stand management. European Journal of Forest Research 131: 1199–1209.
- ERTELD, W. (1962): Wachstumsgang und Vorratsbehandlung der Eiche im norddeutschen Diluvium. Archiv für Forstwesen 11 (11): 1155–1176.
- ERTELD, W. (1963): Ertragstafelauszüge für den Gebrauch in der Praxis. Radebeul: Neumann.
- ESPER, J.; COOK, E. R.; SCHWEINGRUBER, F. H. (2002): Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. Science 295: 2250–2252.
- ESPER, J.; TREYDTE, K.; FRANK, D. C.; GÄRTNER, H.; BÜNTGEN, U. (2004): Temperaturvariationen und Jahrringe. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 155: 213–221.

- FEKEDULEGN, D.; HICKS, R. R.; COLBERT, J. J. (2003): Influence of topographical aspect, precipitation and drought on radial growth of four major tree species in an Appalachian watershed. *Forest Ecology and Management* 177: 409–425.
- FINKELDEY, R. (2001): Genetic Variation of Oaks (*Quercus* spp.) in Switzerland. *Silvae Genetica* 50 (1): 22–30.
- FINKELDEY, R. (2010): Genetik, Ökologie, Forstwirtschaft: Zusammenhänge und Perspektiven. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 161 (6): 198–206.
- FINKELDEY, R.; HATTEMER, H. H. (2010): Genetische Variation in Wäldern - wo stehen wir? *Forstarchiv* 81: 123–129.
- FISH, T.; WILSON, R.; EDWARDS, C.; MILLS, C.; CRONE, A.; KIRCHHEFER, A. J.; LINDERHOLM, H. W.; LOADER, N. J.; WOODLEY, E. (2010): Exploring for senescence signals in native scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Scottish Highlands. *Forest Ecology and Management* 260: 321–330.
- FLEMMING, G. (1994): Wald-Wetter-Klima. Einführung in die Forstmeteorologie. 3. Aufl. Berlin: DLV.
- FRANKLIN, J. F.; SHUGART, H. H.; HARMON, M. E. (1987): Tree Death as an Ecological Process. *BioScience* 37 (8): 550–556.
- FRIEDRICH, D. A. (2008): Spatio-temporal patterns of tree-growth response to climatic change. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät. Online verfügbar unter http://hss.ulb.unibonn.de/diss_online.
- FRIEDRICH, D. A.; TROUET, V.; BÜNTGEN, U.; FRANK, D. C.; ESPER, J.; NEUWIRTH, B.; LÖFFLER, J. (2009): Species-specific climate sensitivity of tree growth in Central-West Germany. *Trees* 23: 729–739.
- FRITTS, H. C. (1976): *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press.
- FRITTS, H. C.; SWETNAM, T. W. (1989): Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments. In: M. Begon, A. H. Fitter, E. D. Ford, A. Macfadyen und Michael Begon (Hg.): *Advances in Ecological Research*, Bd. 19. London: Academic Press (19): 111–188.
- FÜHRER, E. (1998): Oak Decline in Central Europe: A Synopsis of Hypotheses. In: M. L. McManus und A. M. Liebhold (Hg.): *Proceedings: Population Dynamics, Impacts, and Integrated Management of Forest Defoliating Insects*. Radnor, Pennsylvania (Gen. Tech. Rep. NE-, 247): 7–24.
- FUJIMORI, T. (2001): *Ecological and Silvicultural Strategies for Sustainable Forest Development*. Amsterdam, London, New York: Elsevier.
- FÜSSEL, H. M.; KLEIN, H. J. T. (2006): Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking. *Climatic Change* 75: 301–329.
- GAILING, O.; VORNAM, B.; LEINEMANN, L.; CURTU, A. L.; FINKELDEY, R. (2010): Genetische Ansätze zur Charakterisierung adaptiver genetischer Variation bei Eichen. *Forstarchiv* 81: 150–155.
- GALLOPÍN, G. C. (2006): Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change* 16: 293–303.
- GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; ECKSTEIN, D. (2003): Climatic signal of earlywood vessels of oak on a maritime site. *Tree Physiology* 23: 497–504.
- GARCÍA-GONZÁLEZ, I.; FONTI, P. (2008): Ensuring a representative sample of earlywood vessels for dendroecological studies: an example from two ring-porous species. *Trees* 22: 237–244.
- GEMBALLA, R.; SCHLUTOW, A. (2007): Überarbeitung der Forstlichen Klimagliederung Sachsens. *AFZ – Der Wald* 62 (15): 822–826.
- GERSTENGARBE, F. W.; BADECK, F.; HATTERMANN, F.; KRYSANOVA, V.; LAHMER, W.; LASCH, P. ET AL. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. Potsdam. (PIK Reports, 83).
- GEYER, J.; KIEFER, I.; KREFT, S.; CHAVEZ, V.; SALAFSKY, N.; JELTSCH, F.; IBISCH, P. L. (2011): Classification of Climate-Change-Induced Stresses on Biological Diversity. *Conservation Biology* 25 (4): 708–715.
- GIEGER, T.; THOMAS, F. M. (2002): Effects of defoliation and drought stress on biomass partitioning and water relations of *Quercus robur* and *Quercus petraea*. *Basic and Applied Ecology* 3 (2): 171–181.
- GIEGER, T.; THOMAS, F. M. (2005): Differential response of two Central-European oak species to single and combined stress factors. *Trees* 19 (5): 607–618.
- GJERDE, S.; GREPPERUD, S.; KVERNDOKK, S. (1999): Optimal Climate Policy under the Possibility of a Catastrophe 21: 289–317.
- GORCZYNSKI, W. (1920): Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. (Über die Berechnung des Kontinentalitätsgrades und seine Anwendung in der Klimatologie). *Geografiska Annaler* 2: 324–331.
- GOULD, S. J. (1988): Kropotkin was no crackpot. *Natural History* 97 (7): 12–21.

- GOULD, S. J. (2003): When Less Is Truly More. In: S. J. Gould (Hg.): I Have Landed. Splashes and Reflections in Natural History. London: Vintage: 225–228.
- GOULD, S. J.; ELDREDGE, N. (1977): Punctuated equilibria: The tempo and mode of evolution reconsidered. *Paleobiology* 3 (2): 115–151.
- GOWER, J. C. (1971): A General Coefficient of Similarity and Some of Its Properties. *Biometrics* 27 (4): 857–871.
- GRIESER, J. (1997): Analyse und Interpretation dendrochronologischer Daten zur Klimageschichte. *Archäologische Analytik*. Online verfügbar unter <http://www.juergen-grieser.de/germanoldcentury/dendrologie/dfg.html>, zuletzt geprüft am 29.01.2013.
- GRÜLL, M. (2006): Eichen – Bestandeszieltypen und ihre standörtlichen Grundlagen. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäbster Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 121–126.
- GRUNDMANN, B. M. (2009): Dendroklimatologische und dendroökologische Untersuchungen des Zuwachsverhaltens von Buche und Fichte in naturnahen Mischwäldern. Dissertation. TU Dresden, Dresden/Tharandt. Institut für Forstbotanik und Forstzoologie.
- GUERICKE, M.; SCHRÖDER, J.; ENDE, H.-P (2010): Projekt zur Anpassung durch Mischwaldentwicklung gestartet. *AFZ – Der Wald* 65 (5): 24–25.
- GUILLEY, E.; HERVÉ, J. -C; NEPVEU, G. (2004): The influence of site quality, silviculture and region on wood density mixed model in *Quercus petraea* Liebl. *Forest Ecology and Management* 189: 111–121.
- GUIOT, J. (1991): The bootstrapped response function. *Tree-Ring Bulletin* 51: 39–41.
- GUNDERSON, L. H. (2000): Ecological Resilience - in Theory and Application. *Annual Review of Ecology and Systematics* 31: 425–439.
- GÜNTHER, B. (2013): Erarbeitung einer Methode zur Erfassung von dendrochronologisch relevanten Jahrringmerkmalen der Trauben-Eiche (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) auf Grundlage der Röntgendensitometrie. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Institut für Forstnutzung und Forsttechnik.
- HAGGENMÜLLER, K.; LUTHARDT, V. (2009): Pflanzenphänologische Veränderungen als Folge von Klimawandel in unterschiedlichen Regionen Brandenburgs. *Phänologie-Journal* 33: 1–3.
- HAMPE, A.; PETIT, R. J. (2005): Conserving biodiversity under climate change: the rear edge matters. *Ecology Letters* 8: 461–467.
- HAMPE, A.; JUMP, A. S. (2011): Climate Relicts: Past, Present, Future. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 42: 313–333.
- HANEWINKEL, M.; HUMMEL, S.; ALBRECHT, A. (2011): Assessing natural hazards in forestry for risk management: a review. *European Journal of Forest Research* 130 (3): 329–351.
- HANEWINKEL, M.; HUMMEL, S.; CULLMANN, D. (2009): Modelling and economic evaluation of forest biome shifts under climate change in Southwest Germany. *Forest Ecology and Management* 259: 710–719.
- HARTMANN, G.; BLANK, R. (1992): Winterfrost, Kahlfraß und Prachtkäferbefall als Faktoren im Ursachenkomplex des Eichensterbens in Norddeutschland. *Forst und Holz* 47 (15): 443–552.
- HARTMANN, G.; BLANK, R. (1998): Aktuelles Eichensterben in Niedersachsen - Ursachen und Gegenmaßnahmen. *Forst und Holz* 53: 733–735.
- HARTMANN, H. (2011): Will a 385 million year-struggle for light become a struggle for water and for carbon? – How trees may cope with more frequent climate change-type drought events. *Global Change Biology* 17: 642–655.
- HASEL, K.; SCHWARTZ, E. (2006): *Forstgeschichte. Ein Grundriß für Studium und Praxis*. 3. Aufl. Remagen: Dr. Kessel.
- HASENAUER, H. (1999): Climate Variations and Tree Growth between 1961 and 1995 in Austria. In: T. Karjalainen, H. Spiecker und O. Laroussinie (Hg.): Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe. Proceedings of the International Conference held in Nancy, France, May 1998. Joensuu: 75–86.
- HEINIMANN, H. R. (2010): A concept in adaptive ecosystem management — An engineering perspective. *Forest Ecology and Management* 259: 848–856.
- HEINSDORF, D. (1993): The role of nitrogen in declining Scots pine forests (*Pinus sylvestris*) in the lowland of East Germany. *Water, Air, and Soil Pollution* 69: 21–35.
- HERMS, D. A.; MATTSON, W. J. (1991): Does reproduction compromise defense in woody plants? In: Y. P. Baranchikov, W. J. Mattson, F. P. Hain und T. L. Payne (Hg.): *Forest Insect Guilds: Patterns of Interaction with Host Trees* (USDA Forest Service General Technical Report, NE-153): 35–46. Online verfügbar unter http://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne153/gtr_ne153_035.pdf.
- HERMS, D. A.; MATTSON, W. J. (1992): The Dilemma of Plants: To Grow or Defend. *The Quarterly Review of Biology* 67 (3): 283–335.

- HERTEL, H.; ZASPEL, I. (1996): Investigations on vitality and genetic structure in oak stands. *Annals of Forest Science* 53: 761–773.
- HILASVUORI, E.; BERNINGER, F. (2010): Dependence of tree ring stable isotope abundances and ring width on climate in Finnish oak. *Tree Physiology* 30: 636–647.
- HMUELV (2010): Waldzustandsbericht 2010. Herausgeber: Hessisches Ministerium für Umwelt Energie Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Göttingen.
- HOFMANN, G.; POMMER, U. (2005): Potentielle Natürliche Vegetation von Brandenburg und Berlin. Potsdam: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, XXIV).
- HÖHNE, I.; MARQUARDT, C. (2007): Oberförsterei Siehdichum. Archivarische Einblicke in die Bestandesgeschichte ausgewählter Jagen/Abteilungen im Zeitraum von 1758 bis 1937. Eberswalde.
- HÖHNE, I.; MARQUARDT, C. (2009): Die Rochauer Heide in der Oberförsterei Hohenbucko. Archivarische Einblicke in die Bestandesgeschichte ausgewählter Jagen/Abteilungen im Zeitraum von 1557 bis 1923. Eberswalde.
- HÖHNE, I.; PANKA, S.; RÜFFER, O.; SCHMIDT, S. (2006): Der Naturwald Möncheichen – Kiefer, Eiche und Rot-Buche im Spiegelbild der Bestockungsgeschichte. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 149–158.
- HOLLING, C. S. (1973): Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1–23.
- HOLLING, C. S. (2001): Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecology* 4: 390–405.
- HÖLTKEN, A. M.; BUSCHBOM, J.; KÄTZEL, R. (2012): Die Artintegrität unserer heimischen Eichen *Quercus robur* L., *Q. petraea* (Matt.) Liebl. und *Q. pubescens* Willd. aus genetischer Sicht. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 183 (5/6): 100–110.
- HORNSCHUCH, F. (2009): Struktur und Morphologie von Feinwurzeln in einem geschädigten und in einem ungeschädigten Traubeneichenbestand. Schlussbericht zum Werkvertrag. Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde. Eberswalde.
- HORNSCHUCH, F.; RIEK, W.; ROLOFF, A. (2008): Die räumliche Struktur der Feinwurzelsysteme in Reinbeständen von Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.), Trauben-Eiche (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl.) und Wald-Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) auf grundwasserfernen Sandböden Brandenburgs und Nordwest-Polens. *Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie* 42 (1): 26–40.
- HUGHES, M. K. (2011): Dendroclimatology in High-Resolution Paleoclimatology. In: M. K. Hughes, T. W. Swetnam und H. F. Diaz (Hg.): *Dendroclimatology. Progress and Prospects*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer (Developments in Paleoenvironmental Research, 11): 17–34.
- HUGHES, M. K.; SWETNAM, T. W.; DIAZ, H. F. (Hg.) (2011): *Dendroclimatology. Progress and Prospects*. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer (Developments in Paleoenvironmental Research, 11).
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2000): IPCC Special Report Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. Genf.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Summary for policy makers*. Genf: www.ipcc.ch.
- JEDICKE, E.; HACKES, W. (2005): Management von Eichenwäldern im Rahmen der FFH-Richtlinie. Eichen-Verjüngung im Wirtschaftswald: durch Prozessschutz ausgeschlossen? *Naturschutz und Landschaftsplanung* 37 (2): 37–45.
- JENKINS, M. A.; PALLARDY, S. G. (1995): The influence of drought on red oak group species growth and mortality in the Missouri Ozarks. *Canadian Journal of Forest Research* 25 (7): 1119–1127.
- JUMP, A. S.; PEÑUELAS, J. (2005): Running to stand still: adaptation and the response of plants to rapid climate change. *Ecology Letters* 8: 1010–1020.
- KABRICK, J. E.; DEY, D. C.; JENSEN, R. G.; WALLENDORF, M. (2008): The role of environmental factors in oak decline and mortality in the Ozark Highlands. *Forest Ecology and Management* 255: 1409–1417.
- KAHLE, H. P. (1994): Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Variation von klimatischen Elementen des Wasserhaushalts und dem Radialzuwachs von Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) aus Hochlagen des Südschwarzwalds. Eine standortbezogene dendroökologische Untersuchung unter besonderer Berücksichtigung von Trockenstress. Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- KAHLE, H. P. (2011): Führt beschleunigtes Wachstum zu schnellerem Altern? In: J. Nagel (Hg.): *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung*. Cottbus: 102–108.

- KAHLE, H. P.; MUTSCHLER, A.; SPIECKER, H. (2007): Zuwachsreaktionen von Waldbäumen auf Trockenstress. Erste Ergebnisse retrospektiver Analysen in verschiedenen Höhenlagen des Südschwarzwaldes unter besonderer Berücksichtigung der Jahre 1947, 1976 und 2003. In: J. Nagel (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung. Alsfeld: 6–16.
- KAHN, M. (1994): Modellierung der Höhenentwicklung ausgesuchter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. München (Forstliche Forschungsberichte München, 141).
- KALHOFF, MECHTHILD (1996): Reactions of Fine Roots in a Pine-Oak Forest Ecosystem to Summer Drought Periods. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie 26: 85–89.
- KALLWEIT, R. (2006): Die Entwicklung des Kronenzustandes der Eichen seit Beginn der Waldschadenserhebung. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 49–58.
- KARJALAINEN, T.; SPIECKER, H.; LAROUSSINIE, O. (Hg.) (1999): Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe. Proceedings of the International Conference held in Nancy, France, May 1998. European Forest Institute. Joensuu.
- KÄTZEL, R. (2003): Biomarker als Indikatoren des Vitalitätszustandes der Gemeinen Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) im nordostdeutschen Tiefland. Habilitation. TU Dresden, Dresden/Tharandt.
- KÄTZEL, R. (2006): Zur taxonomischen Einordnung der einheimischen Eichenarten. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 12–13.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (2006): Physiologische Reaktionen von Eichen unter Trockenstress. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 85–93.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S.; MÖLLER, K.; HEYDECK, P.; KALLWEIT, R. (2006): Das Eichensterben als Komplexkrankheit. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 94–96.
- KÄTZEL, R.; LÖFFLER, S. (2007): Langzeituntersuchungen zu physiologischen Anpassungsreaktionen der Kiefer auf Dauerbeobachtungsflächen der forstlichen Umweltkontrolle (Level II). In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland - Ökologie und Bewirtschaftung. Eberswalde/Potsdam (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 32): 144–166.
- KÄTZEL, R. (2008): Klimawandel - zur genetischen und physiologischen Anpassungsfähigkeit der Waldbaumarten. Archiv für Forstwesen und Landschaftsökologie 42 (1): 9–15.
- KÄTZEL, R.; BECKER, F.; SCHRÖDER, J.; GLATTHORN, J.; HÖLTKEN, A. M.; LÖFFLER, S. (2012): Flaum- und Zerr-Eiche in Brandenburg – Alternative Baumarten im Klimawandel? In: MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hg.): Wissenstransfer in die Praxis. Beiträge zum 7. Winterkolloquium am 23. Februar 2012 in Eberswalde (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 49): 23–36.
- KELLY, P. M.; LEUSCHNER, H. H.; BRIFFA, K. R.; HARRIS, I. C. (2002): The climatic interpretation of pan-European signature years in oak ring-width series. The Holocene 12: 689–694.
- KIMMINS, J. P. (1987): Forest Ecology. New York and London: MacMillan Publishing Company.
- KIRILENKO, A. P.; SEDJO, R. A. (2007): Climate change impacts on forestry. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 104 (50): 19697–19702.
- KLEINSCHMIT, J. (1993): Intraspecific variation of growth and adaptive traits in European oak species. Suppl. 1. Annals of Forest Science 50: 166–185.
- KLOTZ, K. (1959): Waldumbau als Aufgabe dynamischer Betriebsgestaltung, dargestellt an den Verhältnissen des Forstamtes Zwiesel-Ost. München: BLV Verlagsgesellschaft.
- KLUGMANN, K.; ROLOFF, A. (1999): Ökophysiologische Bedeutung von Zweigabsprünge (Kladoptosis) unter besonderer Berücksichtigung der Symptomatologie von *Quercus robur* L. Forstwissenschaftliches Centralblatt 118: 271–286.
- KNOKE, TH; AMMER, CH; STIMM, B.; MOSANDL, R. (2008): Admixing broadleaved to coniferous tree species: a review on yield, ecological stability and economics. European Journal of Forest Research 127 (2): 89–101.
- KOCH, H. G. (1958): Der Holzzuwachs der Waldbäume in verschiedenen Höhenlagen Thüringens in Abhängigkeit von Niederschlag und Temperatur. Archiv für Forstwesen 7 (1): 27–49.
- KÖHL, M.; HILDEBRANDT, R.; OLSCHOFKY, K.; KÖHLER, R.; RÖTZER, T.; METTE, T.; PRETZSCH, H.; KÖTHKE, M.; DIETER, M.; ABIY, M.; MAKESCHIN, F.; KENTER, B. (2010): Combating the effects of climatic change on forests by

- mitigation strategies. *Carbon Balance and Management* (5:8). Online verfügbar unter <http://www.cbjournal.com/content/5/1/8>, zuletzt geprüft am 21.01.2013.
- KOHLER, M.; SOHN, J.; NÄGELE, G.; BAUHUS, J. (2010): Can drought tolerance of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) be increased through thinning? *European Journal of Forest Research* 129: 1109–1118.
- KÖLLING, C.; ZIMMERMANN, L. (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 67 (6): 259–268.
- KONDRACKI, J. (1998): *Geografia regionalna Polski. Regionale Geografie Polens*. In Polnisch. Warschau: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- KOPP, D.; SCHWANECKE, W. (1994): *Standörtlich-naturräumliche Grundlagen ökologischer Forstwirtschaft. Grundzüge von Verfahren und Ergebnissen der forstlichen Standorterkundung in den fünf ostdeutschen Bundesländern*. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- KORPELA, M.; NÖJD, P.; HOLLMÉN, J.; MÄKINEN, H.; SULKAVA, M.; HARI, P. (2011): Photosynthesis, temperature and radial growth of Scots pine in northern Finland: identifying the influential time intervals. *Trees* 25: 323–332.
- KÖRVER, F.; PAAR, U.; KIRCHHOFF, A.; GAWEHN, P.; EICHORN, J. (1999): Winteransprache zur Erfassung der Kronenstruktur bei Alteichen. *AFZ – Der Wald* 54 (7): 357–360.
- KRAFT, G. (1884): *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Hannover: Klindworth's Verlag.
- KRAHL-URBAN, J. (1939): *Untersuchungen über den Jahrringbau der Eichen im Preuß. Forstamt Freienwalde*. Berlin: Neumann-Neudamm.
- KRAHL-URBAN, J. (1959): *Die Eichen. Forstliche Monographie der Traubeneiche und der Stieleiche*. Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey.
- KRAHL-URBAN, J.; LIESE, J.; SCHWERDTFEGER, F. (1944): Das Eichensterben im Forstamt Hellefeld. *Zeitschrift für das gesamte Forstwesen* 70 (1): 70–86.
- KRAJICEK, J. E.; BRINKMAN, K. E.; GINGRICH, S. F. (1961): Crown competition - a measure of density. *Forest Science* 7: 35–42.
- KRAMER, K. (2007): Resilience of European Forests: towards a non-equilibrium view for the management of diversity. In: Koskela, J.; Buck, A.; Tessier du Cros, E. (Hg.): *Climate change and forest genetics. Implications for sustainable forest management in Europe*. Rom (European Forest Genetic Resources Programme): 43–52.
- KRAUSE, M. (2012): *Die Trauben-Eiche (Quercus petraea (Matt.) Liebl.) im Spannungsverhältnis zwischen Qualität und Vitalität? Masterarbeit*. TU Dresden, Dresden/Tharandt. Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik.
- LANDMANN, G.; BECKER, M.; DELATOUR, C.; DREYER, E.; DUPOUEY, J.-L. (1993): Oak dieback in France: historical and recent records, possible causes, current investigations. In: Bayerische Akademie der Wissenschaften (Hg.): *Zustand und Gefährdung der Laubwälder*. München: Friedrich Pfeil (Rundgespräche der Kommission für Ökologie, 5): 97–113.
- LARCHER, W. (2001): *Ökophysiologie der Pflanzen*. 6. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB).
- LASCH, P.; BADECK, F. W.; LINDNER, M.; SUCKOW, F. (2002): Sensitivity of simulated forest growth to changes in climate and atmospheric CO₂. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121 (Supplement 1): 155–171.
- LASCH, P.; LINDNER, M.; ERHARD, M.; SUCKOW, F.; WENZEL, A. (2002): Regional impact assessment on forest structure and functions under climate change—the Brandenburg case study. *Forest Ecology and Management* 162: 73–86.
- LAUBHANN, D.; STERBA, H.; REINDS, G. J.; VRIES, W. DE (2009): The impact of atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: An individual tree growth model. *Forest Ecology and Management* 258 (8): 1751–1761.
- LEBLANC, D. C.; TERELL, M. A. (2011): Comparison of growth–climate relationships between northern red oak and white oak across eastern North America. *Canadian Journal of Forest Research* 41 (10): 1936–1947.
- LEONHARD, S. (2004): *Vorkommen und Bedeutung pilzähnlicher Phytopathogene (Abt. Oomycota) in ausgewählten Eichenbeständen des Freistaates Sachsen*. Diplomarbeit. TU Dresden, Dresden/Tharandt.
- LEUSCHNER, C.; BACKES, K.; HERTEL, D.; SCHIPKA, F.; SCHMITT, U.; TERBORG, O.; RUNGE, M. (2001): Drought responses at leaf, stem and fine root level of competitive *Fagus sylvatica* L. and *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. trees in dry and wet years. *Forest Ecology and Management* 149: 33–46.
- LFE - LANDESFORSTANSTALT EBERSWALDE (2007): *Waldumbaupotenzial im Land Brandenburg*. Herausgegeben vom MLUV. Potsdam, Eberswalde.
- LINDNER, M.; BUGMANN, H.; LASCH, P.; FLECHSIG, M.; CRAMER, W. (1997): Regional impacts of climatic change on forests in the state of Brandenburg. Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 84: 123–135.
- LINDNER, M.; LASCH, P.; BADECK, F.; BEGUIRISTAIN, P. P.; JUNGE, S.; KELLOMÄKI, S.; PELTOLA, H.; GRACIA, C.; SABATE, S.; JÄGER, D.; LEXER, M.; FREEMAN, M. (2005): *SilviStrat Model Evaluation Exercises*. In: S. Kellomäki

- und S. Leinonen (Hg.): Management of European Forests Under Changing Climatic Conditions. Final Report of the Project "SilviStrat" funded by the European Union. Joensuu (Research Notes, 163): 117–157.
- LINDNER, M.; MAROSCHEK, M.; NETHERER, S.; KREMER, A.; BARBATI, A.; GARCIA-GONZALO, J.; SEIDL, R.; DELZON, S.; CORONA, P.; KOLSTRÖM, M.; LEXER, M. J.; MARCHETTI, M. (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 259: 698–709.
- LINKE, C.; GRIMMERT, S.; HARTMANN, I.; REINHARDT, K. (2010): Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg. Hg. v. Landesumweltamt Brandenburg (LUA). Potsdam (Fachbeiträge des Landesumweltamtes, 113). Online unter http://www.mugv.brandenburg.de/cms/media.php/lbm1.a.2334.de/i_fb113.pdf.
- LLORET, F.; KEELING, E. G.; SALA, A. (2011): Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120 (12): 1909–1920.
- LOCKOW, K.-W. (2006a): Das quantitative und qualitative Leistungsvermögen der Stiel- und Trauben-Eiche. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 35–48.
- LOCKOW, K.-W. (2006b): Erziehung und Pflege der Eichenbestände unter Berücksichtigung der baumartenspezifischen Besonderheiten. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 159–161.
- LÖFFLER, S. (2011): Klimaveränderungen erleben – Phänologische Beobachtungen in Brandenburgs Wäldern. In: MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hg.): Wissenstransfer in die Praxis. Beiträge zum 6. Winterkolloquium am 24. Februar 2011 in Eberswalde (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 47): 9–13.
- LOTZE-CAMPEN, H.; CLAUSSEN, L.; DOSCH, A.; NOLEPPA, S.; ROCK, J.; SCHULER, J.; UCKERT, G. (2009): Klimawandel und Kulturlandschaft Berlin. Hg. v. F. W. Gerstengarbe (PIK Report, 113). Online verfügbar unter <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr113>.
- LUDWIG, D.; WALKER, B.; HOLLING, C. S. (1997): Sustainability, Stability, and Resilience. *Ecology online* 1 (1). Online verfügbar unter <http://www.ecologyandsociety.org/vol1/iss1/art7/>, zuletzt geprüft am 19.01.2013.
- LÜPKE, B. v. (1998): Silvicultural methods of oak regeneration with special respect to shade tolerant mixed species. *Forest Ecology and Management* 106: 19–26.
- LÜPKE, B. v. (2009): Überlegungen zu Baumartenwahl und Verjüngungsverfahren bei fortschreitender Klimaänderung in Deutschland. *Forstarchiv* 80: 67–75.
- LÜPKE, B. v.; HAUSKELLER-BULLERJAHN, K. (1999): Kahlschlagfreier Waldbau: Wird die Eiche an den Rand gedrängt? *Forst und Holz* 54: 563–568.
- LUTHARDT, M. E. (2006): Bestandeszieltypen für die Wälder des Landes Brandenburg. Hg. v. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz Landes Brandenburg (MLUV). Potsdam.
- LUTHARDT, M. E.; KÄTZEL, R. (2006): Schlussbetrachtung und Ausblick. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 183–185.
- LYR, H.; FIEDLER, H. -J.; TRANQUILLINI, W. (Hg.) (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Jena und Stuttgart: Gustav Fischer.
- MANION, P. D. (1981): *Tree Disease Concepts*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- MARTÍNEZ-VILALTA, J.; LÓPEZ, B. C.; LOEPFLE, L.; LLORET, F. (2012): Stand- and tree-level determinants of the drought response of Scots pine radial growth. *Oecologia* 168 (3): 877–88.
- MARTONNE, E. DE (1926): Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. *La Météorologie* 2: 449–458.
- MATYSSEK, R.; FROMM, J.; RENNENBERG, H.; ROLOFF, A. (2010): *Biologie der Bäume. Von der Zelle zur globalen Ebene*. 1. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- MAYER, R. (1958): Kronengröße und Zuwachsleistung der Traubeneiche auf süddeutschen Standorten. Teil I bis III. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 129: 105–114 (I), 151–163 (II), 191–201 (III).
- MAYR, E. (2000): *Das ist Biologie. Die Wissenschaft des Lebens*. Heidelberg und Berlin: Spektrum akademischer Verlag.
- MBOGGA, M. S.; WANG, X.; HAMANN, A. (2010): Bioclimate envelope model predictions for natural resource management: dealing with uncertainty. *Journal of Applied Ecology* 47: 731–740.
- MCCARROLL, D.; LOADER, N. J. (2004): Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 23: 771–801.
- MCCARTHY, J. J.; CANZIANI, O.; LEARY, N. A.; DOKKEN, D. J.; WHITE, K. S. (Hg.) (2001): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. IPCC. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

- McDOWELL, N. (2011): Mechanisms Linking Drought, Hydraulics, Carbon Metabolism, and Vegetation Mortality. *Plant Physiology* 155: 1051–1059.
- McDOWELL, N.; POCKMAN, W. T.; ALLEN, C. D.; BRESHEARS, D. D.; COBB, N.; KOLB, T.; PLAUT, J.; SPERRY, J.; WEST, A.; WILLIAMS, D. G.; YEPEZ, E. A. (2008): Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist* 178: 719–739.
- McDOWELL, N.; SEVANTO, S. (2010): The mechanisms of carbon starvation: how, when, or does it even occur at all? *New Phytologist* (186): 264–266.
- MCMAHON, S. M.; PARKER, G. G.; MILLER, D. (2010): Evidence for a recent increase in forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107 (8): 3611–3615.
- MENGES, E. (2000): Population viability analyses in plants: challenges and opportunities. *Trends in Ecology and Evolution* 15 (2): 51–56.
- MENZEL, A.; FABIAN, P. (1999): Growing season extended in Europe. *Nature* 397: 659.
- MEYER, F. D. (1999): Pointer year analysis in dendroecology: a comparison of methods. *Dendrochronologia* 16-17: 193–204.
- MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (2011a): Waldzustandsbericht 2010 der Länder Brandenburg und Berlin. Potsdam und Berlin.
- MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hg.) (2011b): Wissenstransfer in die Praxis. Beiträge zum 6. Winterkolloquium am 24. Februar 2011 in Eberswalde. (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 47).
- MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (2013): Waldzustandsbericht 2012 der Länder Brandenburg und Berlin. Potsdam und Berlin.
- MILAD, M.; SCHAICH, H.; BÜRGI, M.; KONOLD, W. (2011): Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. *Forest Ecology and Management* 261 (261): 829–843.
- MILLARD, P.; WAY, D. A. (2011): Tree competition and defense against herbivores: currency matters when counting the cost. *Tree Physiology* 31: 579–589.
- MLUR - Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (Hg.) (2004): Waldbau-Richtlinie 2004 "Grüner Ordner" der Landesforstverwaltung Brandenburg. Berlin: vierC digitalprint.
- MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.) (2005): Die zweite Bundeswaldinventur – BWI² – Ergebnisse für Brandenburg und Berlin. Eberswalde: Weimardruck (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 22).
- MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.) (2007): Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland - Ökologie und Bewirtschaftung. Landesforstanstalt Eberswalde. Eberswalde/Potsdam (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 32).
- MÖLLER, K.; APEL, K.-H.; ENGELMANN, A. (2006): Zur Beteiligung von Insekten am aktuellen Krankheitsgeschehen der Eiche in Brandenburg. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäbeler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 59–64.
- MÖLLER, K.; WALTER, C.; ENGELMANN, A.; HIELSCHER, K. (2007): Die Gefährdung der Gemeinen Kiefer durch Insekten. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Die Kiefer im nordostdeutschen Tiefland - Ökologie und Bewirtschaftung. Landesforstanstalt Eberswalde. Eberswalde/Potsdam (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 32).
- MÖLLER, K.; SCHULZ, P. M. (2012): Ergebnisse der Eichenfraßkartierung 2012. Information der Hauptstelle für Waldschutz 8/2012. Hg. v. LFE (Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde). Online verfügbar unter <http://www.lfe.de>.
- MOONEY, H. A.; WINNER, W. E.; PELL, E. J. (Hg.) (1991): Response of Plants to Multiple Stresses. San Diego, CA: Academic Press.
- MORAAL, L. G.; HILSZCZANSKI, J. (2000): The oak buprestid beetle, *Agrilus biguttatus* (F.) (Col., Buprestidae), a recent factor in oak decline in Europe. *Anzeiger für Schädlingskunde / Journal of Pest Science* 73: 134–138.
- MOSANDL, R.; EL KATEB, H.; ECKER, J. (1991): Untersuchungen zur Behandlung von jungen Eichenbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 110: 358–370.
- MUCHIN, A. (2005): Analytische Untersuchungen zum Einfluss des Standorts auf das Wachstum von Stiel- und Traubeneiche im nordostdeutschen Tiefland. Stuttgart und Dresden: Eugen Ulmer (Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt/Contributions to Forest Sciences, 24).
- MÜLLER, J.; LUTHARDT, M. E. (2009): Wald- und Kiefernland Brandenburg. *AFZ – Der Wald* 64 (12): 635–637.

- MÜLLER, K. (2006): Zur aktuellen Verbreitung von Stiel- und Trauben-Eichen in Brandenburg. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 27–32.
- MÜNDE, K. (2005): Konkurrenzuntersuchungen und Wachstumsmodellierung in Waldumbaubeständen des Mittleren Erzgebirges. Dissertation. TU Dresden, Dresden/Tharandt.
- NAGEL, R.-V. (2007): Bestandesentwicklung, Einzelbaumwachstum und Qualitätsentwicklung von Stiel- und Traubeneichenbeständen in Nordwestdeutschland unter dem Einfluß unterschiedlicher Durchforstungsstärken. In: J. Nagel (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung. Alsfeld: 114–132.
- NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (Hg.) (2000): Special Report on Emissions Scenarios. Summary for Policymakers. A special report of IPCC Working Group III. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press.
- NEBE, W.; ROLOFF, A.; VOGEL, M. (Hg.) (1998): Untersuchung von Waldökosystemen im Erzgebirge als Grundlage für einen ökologisch begründeten Waldumbau. Tharandt (Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt, 4).
- NELSON, A. (2005): Cold War Ecology. Forests, Farms, and People in the East German Landscape, 1945-1989. New Haven & London: Yale University Press (Yale Agrarian Studies Series, 15).
- NEUMANN, U. (2001): Zusammenhang von Witterungsgeschehen und Zuwachsverläufen in Fichtenbeständen des Osterzgebirges. Stuttgart: Ulmer (Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt/Contributions to Forest Sciences, 11).
- NEUMANN, U.; RÖHLE, H. (2001): Der jährliche Radialzuwachs der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) in den sächsischen Mittelgebirgen in Abhängigkeit von der Witterung. Forstwissenschaftliches Centralblatt 120: 277–287.
- NEUWIRTH, B.; FRIEDRICH, D. A.; HENNEN, M. (2007a): 2003 – where is the negative pointer year? A case study for the NW-German low mountain ranges. In: K. Haneca, A. Verheyden, H. Beeckmann, H. Gärtner, G. Helle und G. H. Schleser (Hg.): TRACE - Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology. Vol. 5: Proceedings of the Dendrosymposium April 20th-22nd 2006, Tervuren, Belgium. Jülich: FZJ Zentralbibliothek/Verlag (Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt/Environment, 74): 113–120.
- NEUWIRTH, B.; SCHWEINGRUBER, F. H.; WINIGER, M. (2007b): Spatial patterns of Central European pointer years. Dendrochronologia 24: 79–89.
- NEWMAN, G. S.; ARTHUR, M. A.; MULLER, R. N. (2006): Above- and Belowground Net Primary Production in a Temperate Mixed Deciduous Forest. Ecosystems 9.
- NOACK, M. (2006): Wachstumsgesetzmäßigkeiten der Trauben-Eiche unter Kieferschirm. Waldwachstumskundliche Untersuchungen zum Voranbau der Trauben-Eiche in Kiefernbeständen des Nordostdeutschen Tieflandes auf standörtlicher Grundlage. Hamburg: Dr. Kovac.
- NOACK, M. (2009): Standortökologisch-biomathematische Grundlagen für die Umwandlung von Kiefernreinbeständen in Kiefern-Trauben-Eichen-Mischbestände als Beitrag zur zukunftsorientierten Ressourcennutzung im Nordostdeutschen Tiefland. Habilitation. Humboldt-Universität, Berlin.
- NOACK, M. (2011): Waldbau ökologisch – Die Bewirtschaftung der Traubeneiche auf Basis ökologischer Wachstumsmodelle. In: MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hg.): Wissenstransfer in die Praxis. Beiträge zum 6. Winterkolloquium am 24. Februar 2011 in Eberswalde. (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 47): 50–59.
- NOACK, M. (2012): Der langfristige Durchforstungsversuch „PEITZ 150“: Forschungsbeitrag zum Wachstum der Gemeinen Kiefer auf nährkraftschwachen Böden im Land Brandenburg unter dem Einfluss von Standortswandel und Durchforstung. In: MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg (Hg.): Wissenstransfer in die Praxis. Beiträge zum 7. Winterkolloquium am 23. Februar 2012 in Eberswalde (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 49): 56–72.
- NOWACKI, G. J.; ABRAMS, M. D. (1997): Radial Growth Averaging Criteria for Reconstructing Disturbance Histories from Presettlement-Origin Oaks. Ecological Monographs 67 (2): 225–249.
- NW-FVA (2011): Waldzustandsbericht 2011 für Niedersachsen. Hg. von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt. Göttingen.
- ORLOWSKY, B.; GERSTENGARBE, F.-W.; WERNER, P. C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. Theoretical and Applied Climatology 92: 209–223.
- OSTRY, M. E.; VENETTE, R. C.; JUZWIK, J. (2011): Decline as a disease category: Is it helpful? Phytopathology 101 (4): 404–409.
- OSZAKO, T. (2004): Protection of forest against pest insects and diseases. European Oak Decline Study Case. Warschau: Sowa.
- OSZAKO, T.; DELATOUR, C. (Hg.) (2000): Recent advances on oak health in Europe. Selected papers from a conference held in Warsaw, Poland, 22-24 November 1999. IBL. Warschau.

- OTTO, H.-J. (1994): Waldökologie. Stuttgart: Ulmer (UTB für Wissenschaft).
- OVERBECK, M.; SCHMIDT, M.; NAGEL, R.-V.; HANSEN, J. (2012): Modellbasierte Simulation waldbaulicher Anpassungsstrategien an den Klimawandel am Beispiel des niedersächsischen Harzes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 183 (9-10): 208–220.
- PARRY, M. L.; CANZAINI, O. F.; PALUTIKOF, J. P.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. (Hg.) (2007): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- PEARSON, R. G.; DAWSON, T. P. (2003): Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography* 12: 361–371.
- PEDERSEN, B. (1998): The role of stress in the mortality of midwestern oaks as indicated by growth prior to death. *Ecology* 79 (1): 79–93.
- PENG, CH (2000): Growth and yield models for uneven-aged stands: past, present and future. *Forest Ecology and Management* (132): 259–279.
- PÉREZ, P. J.; KAHLE, H. P.; SPIECKER, H. (2005): Growth trends and relationships with environmental factors for scots pine [*Pinus sylvestris* (L.)] in Brandenburg. *Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales* 14 (1): 64–78.
- PETERSON, G.; ALLEN, C. R.; HOLLING, C. S. (1998): Ecological Resilience, Biodiversity, and Scale. *Ecosystems* 1: 6–18.
- PETIT, R. J.; CSAIKL, U. M.; BORDÁCS, S.; BREWER, S.; BURG, K.; COART, E.; COTTRELL, J.; VAN DAM, B.; DEANS, J. D.; DUMOLIN-LAPÈGUE, S.; FINESCHI, S.; FINKELDEY, R.; GILLIES, A.; GLAZ, I.; GOICOECHEA, P. G.; JENSEN, J. S.; KÖNIG, A. O.; LOWE, A. J.; MADSEN, S. F.; MÁTYÁS, G.; MUNRO, R. C.; OLALDE, M.; PEMONGE, M. H.; POPESCU, F.; SLADE, D.; TABBENER, H.; TAURCHINI, D.; VRIES, S. G. M. DE; ZIEGENHAGEN, B.; BEAULIEU, J. -L.; KREMER, A. (2002): Identification of refugia and post-glacial colonization routes of European white oaks based on chloroplast DNA and fossil pollen evidence. *Forest Ecology and Management* 156: 49–74.
- PETIT, R. J.; HU, F. S.; DICK, C. W. (2008): Forests of the past: a window to future changes. *Science* (320): 1450–1452.
- PIELOU, E. C. (1977): *Mathematical Ecology*. New York City: Wiley.
- PILCHER, J.R (1990): Sample Preparation, Cross-dating, and Measurement. In: E. R. Cook und L. A. Kairiukstis (Hg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.: 40–51.
- PIUTTI, E.; CESCATTI, A. (1997): A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intra-specific competition in European beech. *Canadian Journal of Forest Research* 27 (3): 277–284.
- PRETZSCH, H. (1995): Perspektiven einer modellorientierten Waldwachstumsforschung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 114: 188–209.
- PRETZSCH, H. (1996): Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handelns. In: G. Kenk (Hg.): *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung*. Neresheim: 134–154.
- PRETZSCH, H. (2001): *Modellierung des Waldwachstums*. Berlin: Parey.
- PRETZSCH, H. (2008): Wirkung von Stress auf die Allometrie von Baumkronen. In: J. Nagel (Hg.): *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung*. Trippstadt: 5–21.
- PRETZSCH, H. (2012): Zuwachsreaktionen auf Trockenstress in Mischbeständen im Vergleich zu Reinbeständen. In: J. Nagel (Hg.): *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung*. Wien: 21–32.
- PRETZSCH, H.; BIBER, P.; DURSKEY, J. (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management* (162): 3–21.
- PRETZSCH, H.; BLOCK, J.; DIELER, J.; DONG, P. H.; KOHNLE, U.; NAGEL, J.; SPELLMANN, H.; ZINGG, A. (2010): Comparison between the productivity of pure and mixed stands of Norway spruce and European beech along an ecological gradient. *Annals of Forest Science* 67: 712–723.
- PRICE, P. W. (1991): The plant vigor hypothesis and herbivore attack. *Oikos* 62: 244–251.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011): *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria.
- REHFUESS, K. E.; AGREN, G. I.; ANDERSSON, F.; CANNELL, M. G. R.; FRIEND, A.; HUNTER, I.; KAHLE, H. P.; PRIETZEL, J.; SPIECKER, H. (Hg.) (1999): *Relationships Between Recent Changes of Growth and Nutrition of Norway spruce, Scots Pine and European Beech Forests in Europe (RECOGNITION)*. European Forest Institute. Torikatu (EFI working paper, 19).
- RENNENBERG, H.; LORETO, F.; POLLE, A.; BRILLI, F.; FARES, S.; BENIWAL, R. S.; GESSLER, A. (2006): Physiological Responses of Forest Trees to Heat and Drought. *Plant Biology* 8 (5): 556–571.
- REWALD, B.; LEUSCHNER, C. (2009): Belowground competition in a broad-leaved temperate mixed forest: pattern analysis and experiments in a four-species-stand. *European Journal of Forest Research* 128: 387–398.

- REYER, C. P. O.; LEUZINGER, S.; RAMMIG, A.; WOLF, A.; BARTHOLOMEUS, R. P.; BONFANTE, A.; LORENZI, F. DE; DURY, M.; GLONING, P.; JAOUDE, R. A.; KLEIN, T.; KUSTER, T. M.; MARTINS, M.; NIEDRIST, G.; RICCARDI, M.; WOHLFAHRT, G.; ANGELIS, P. DE; DATO, G. DE; FRANCOIS, L.; MENZEL, A.; PEREIRA, M. (2013): A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global Change Biology* 19 (1): 75-89.
- RIEMER, T. (1994): Über die Varianz von Jahrringbreiten. *Statistische Methoden für die Auswertung der jährlichen Dickenzuwächse von Bäumen unter sich ändernden Lebensbedingungen*. Göttingen (Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, 121).
- RÖHLE, H. (1987): Entwicklung von Vitalität, Zuwachs und Biomassenstruktur der Fichte in verschiedenen bayerischen Untersuchungsgebieten unter dem Einfluß der neuartigen Walderkrankungen. München (Forstliche Forschungsberichte München, 83).
- RÖHLE, H. (1995): Zum Wachstum der Fichte auf Hochleistungsstandorten in Südbayern. *Mitt. aus der Staatsforstverwaltung Bayerns* (48): 272.
- RÖHLE, H. (1996): Wachstumstrends in Fichten-, Buchen- und Eichenbeständen. In: G. Kenk (Hg.): *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung*. Neresheim: 13-23.
- RÖHLE, H. (1997): Änderung von Bonität und Ertragsniveau in südbayerischen Fichtenbeständen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 168 (6/7): 110-114.
- RÖHLE, H.; GEROLD, D.; GEMBALLA, R. (2010): Beziehungen zwischen Klima und Zuwachs, dargestellt am Beispiel von Fichte, Kiefer und Buche in Sachsen. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 181 (1/2): 21-34.
- RÖHLE, H.; HUBER, W. (1985): Untersuchungen zur Methode der Ablotung von Kronenradien und der Berechnung von Kronengrundflächen. *Forstarchiv* 56 (6): 238-243.
- RÖHRIG, E. (1982): *Waldbau auf ökologischer Grundlage*. 5. Aufl. 2 Bände. Hamburg und Berlin: Paul Parey Verlag.
- ROLLAND, C. (2002): Decreasing teleconnections with inter-site distance in monthly climatic data and tree-ring width networks in a mountainous Alpine area. *Theoretical and Applied Climatology* 71: 63-75.
- ROLOFF, A. (1985): Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen.
- ROLOFF, A. (1993): Kronenentwicklung und Vitalitätsbeurteilung ausgewählter Baumarten der gemäßigten Breiten. Zweite, unveränderte Aufl. Frankfurt am Main (Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, 93).
- ROLOFF, A.; KLUGMANN, K. (1997): Ursachen und Dynamik von Eichen-Zweigabsprüngen. Dresden/Tharandt (Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt/Contributions to Forest Sciences, 1).
- ROSKAMS, P.; SIOEN, G. (2000): The condition of *Quercus robur* L. in the Flemish region. In: T. Oszako und C. Delatour (Hg.): *Recent advances on oak health in Europe. Selected papers from a conference held in Warsaw, Poland, 22-24 November 1999*. Warschau: 117-120.
- ROUAULT, G.; CANDAU, J. N.; LIEUTIER, F.; NAGELEISEN, L. M.; MARTIN, J. C.; WARZÉE, N. (2006): Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science* 63: 613-624.
- RÜFFER, O.; KÄTZEL, R. (2006): Zur Entwicklungsgeschichte der Eichenwälder im Nordostdeutschen Tiefland. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): *Aktuelle Ergebnisse und Fragen zur Situation der Eiche und ihrer Bewirtschaftung in Brandenburg*. Potsdam, Eberswalde: Hendrik Bäßler Verlag (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 25): 13-22.
- RYAN, M. G. (2011): Tree responses to drought. *Tree Physiology* 31 (3): 237-239.
- RYAN, M. G.; PHILLIPS, N.; BOND, B. J. (2006): The hydraulic limitation hypothesis revisited. *Plant, Cell & Environment* 29 (3): 367-381.
- SALA, A. (2009): Lack of direct evidence for the carbon-starvation hypothesis to explain drought-induced mortality in trees. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106.
- SALA, A.; HOCH, G. (2009): Height-related growth declines in ponderosa pine are not due to carbon limitation. *Plant, Cell & Environment* 32: 22-30.
- SALA, A.; PIPER, F.; HOCH, G. (2010): Physiological mechanisms of drought-induced tree mortality are far from being resolved. *New Phytologist* (186): 274-281.
- SANCHEZ-SALGUERO, R.; NAVARRO-CERILLO, R. M.; SWETNAM, T. W.; ZAVALA, M. A. (2012): Is drought the main decline factor at the rear edge of Europe? The case of southern Iberian pine plantations. *Forest Ecology and Management* 271: 158-169.
- SAVOLAINEN, O.; PYHAJARVI, T.; KNURR, T. (2007): Gene flow and local adaptation in trees. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 38: 595-619.

- SAXE, H.; CANNELL, M. G. R.; JOHNSEN, O.; RYAN, M. G.; VOURLITIS, G. (2001): Tree and forest functioning in response to global warming. *New Phytologist* 149: 369–400.
- SCHÄDELIN, W. (1942): Die Auslesedurchforstung als Erziehungsbetrieb höchster Wertleistung. Bern und Leipzig: Paul Haupt.
- SCHAPER, C. (1978): Das Jugendwachstum von Stiel- und Trauben-Eichen auf norddeutschen Standorten. Dissertation. Georg-August-Universität, Göttingen. Forstwissenschaftliche Fakultät.
- SCHÄR, C.; VIDALE, P. L. LÜTHI D.; FREI, C.; HÄBERLI, C.; LINIGER, M. A.; APPENZELLER, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427: 332–336.
- SCHARNWEBER, T.; MANTHEY, M.; CRIEGEE, C.; BAUWE, A.; SCHRÖDER, C.; WILMKING, M. (2011): Drought matters - Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany. *Forest Ecology and Management* 262: 947–961.
- SCHILDBACH, M. (2010): Untersuchung des Wuchsverhaltens von Kiefern und Birken auf Extremstandorten im Nationalpark Sächsische Schweiz. TU Dresden, Dresden/Tharandt. Institut für Waldwachstum und Forstliche Informatik.
- SCHMID-HAAS, P. (2002): Zur Waldinventur gehört die Überwachung der Vitalität. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 153 (2): 68–75.
- SCHRÖDER, J. (2004): Zur Modellierung von Wachstum und Konkurrenz in Kiefern/Buchen-Waldumbaubeständen Nordwestsachsens. Stuttgart: Ulmer (Contributions to Forest Sciences, 19).
- SCHRÖDER, J. (2008): Wachstum von Traubeneiche und Kiefer in Mischbeständen des nordostdeutschen Tieflands. In: J. Nagel (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung. Trippstadt: 53–62.
- SCHRÖDER, J. (2009a): Kiefer und Eiche in Mischbeständen - Konkurrenz oder Partnerschaft in einer Lebensgemeinschaft? In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): Wissenstransfer in die Praxis. Beiträge zum 4. Winterkolloquium am 26. Februar 2009 in Eberswalde. Druckhaus Eberswalde (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 40): 50–59.
- SCHRÖDER, J. (2009b): Risiken durch Witterungsextreme für Kiefer und Eiche in Nordostdeutschland: Ansätze zur Schätzung des Gefährdungspotenzials. In: MIL - Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft des Landes Brandenburg/Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hg.): Wald im Klimawandel: Risiken und Anpassungsstrategien. Potsdam, Eberswalde: Universitätsdruckerei Potsdam (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 42): 35–43.
- SCHRÖDER, J. (2012): Zum Verhältnis von Kronenvitalität und Zuwachs bei Trauben-Eiche im nordostdeutschen Tiefland. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 183 (9-10): 197–207.
- SCHRÖDER, J.; MICHEL, A.; MARQUARDT, C. (2007a): Vitalität und Struktur von Traubeneichen-Kiefern-Mischbeständen - erste Ergebnisse des Verbundprojektes "OakChain". *Forst und Holz* 62 (9): 12–16.
- SCHRÖDER, J.; RÖHLE, H.; GEROLD, D.; MÜNDE, K. (2007b): Modeling individual-tree growth in stands under forest conversion in East Germany. *European Journal of Forest Research* 126: 459–472.
- SCHRÖDER, J.; BECK, W. (2009): Risikoabschätzung durch witterungsbasierte Modelle für Eiche und Kiefer in Nordostdeutschland. In: J. Nagel (Hg.): Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde: Beiträge zur Jahrestagung. Ascona: 104–113.
- SCHRÖDER, J.; LÖFFLER, S.; MICHEL, A.; KÄTZEL, R. (2009a): Genetische Differenzierung, Zuwachsentwicklung und Witterungseinfluss in Mischbeständen von Traubeneiche und Kiefer. *Forst und Holz* 64 (3): 18–24.
- SCHRÖDER, J.; MICHEL, A.; KÄTZEL, R.; DEGENHARDT, A. (2009b): Bestand und Bewirtschaftung. In: M. Elmer, R. Kätzel, O. Bens, C. -T Bues, H. Sonntag und R. F. Hüttl (Hg.): Nachhaltige Bewirtschaftung von Eichen-Kiefern-Mischbeständen. München: oekom: 45–65.
- SCHRÖDER, J.; PANKA, S. (2009): Wachstum und Qualität von Kiefern verschiedener Herkünfte. Kiefern des internationalen Herkunftsversuchs von 1908. *AFZ - Der Wald* 64 (5): 249–252.
- SCHUMACHER, J.; LEONHARD, S.; SOLGER, A.; ROLOFF, A. (2006): Vorkommen und Bedeutung pilzlicher und pilzähnlicher Phytopathogene in Eichenbeständen des sächsischen Waldumbaus. *Forst und Holz* 61 (1): 15–20.
- SCHÜTT, P.; SCHUCK, H. J.; STIMM, B. (2011): Lexikon der Baum- und Straucharten. Lizenzausgabe. Hamburg: Nikol Verlag.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1983): Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern und Stuttgart: Paul Haupt.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1990): Baum und Holz in der Dendrochronologie. Morphologische, anatomische und jahrringanalytische Charakteristika häufig verwendeter Bäume. Bern/Birmensdorf: Selbstverlag.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1996): Tree Rings and Environment. Dendroecology. Bern, Stuttgart, Wien: Paul Haupt.
- SCHWEINGRUBER, F. H.; BRÄKER, O. U.; SCHÄR, E. (1987): Temperature information from a European dendroclimatological sampling network. *Dendrochronologia* 5: 9–33.

- SCHWEINGRUBER, F. H.; ECKSTEIN, D.; SERRE-BACHET, F.; BRÄKER, O. U. (1990): Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia* 8: 9–38.
- SCHWEINGRUBER, F. H.; KAIRIUKSTIS, L. A.; SHIYATOV, S. G. (1990): Sample Selection. In: E. R. Cook und L. A. Kairiukstis (Hg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.: 23–35.
- SCOTTI, I. (2010): Adaptive potential in forest tree populations: what is it, and how can we measure it? *Annals of Forest Science* 67: 801–802.
- SERRE-BACHET, F.; TESSIER, L. (1990): Response Function Analysis for Ecological Study. In: E. R. Cook und L. A. Kairiukstis (Hg.): *Methods of Dendrochronology. Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ.: 247–258.
- SIWECKI, R.; UFNALSKI, K. (1998): Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *European Journal of Forest Pathology* 28: 99–112.
- SMITH, J. B.; SCHELLNHUBER, H. J.; MIRZA, M. M. Q. (2001): Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis. In: J. J. McCarthy, O. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken und K. S. White (Hg.): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press: 914–967.
- SONESSON, K. (1999): Oak Decline in Southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14 (4): 368–375.
- SPEER, J.H (2010): *Fundamentals of Tree-Ring Research*. Tucson: The University of Arizona Press.
- SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Dessau.
- SPELLMANN, H. (2001): Bewirtschaftung der Eiche auf der Grundlage waldwachstumskundlicher Untersuchungen in Nordwestdeutschland. *Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie* 35 (3): 145–152.
- SPIECKER, H. (1991): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung von Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl. und *Quercus robur* L.). Stuttgart (Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, 72).
- SPIECKER, H. (1999): Overview of recent growth trends in European forests. *Water, Air, and Soil Pollution* 116: 33–46.
- SPIECKER, H. (2007): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung wertvoller Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* [Matt.] Liebl. und *Quercus robur* L.). In: P. H. Dong (Hg.): *Eiche im Pfälzerwald*. Trippstadt (Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz): 78–95.
- SPIECKER, H.; MIELIKÄINEN, K.; KÖHL, M.; SKOVSGAARD, J.P (Hg.) (1996): *Growth Trends in European Forests*. Berlin, Heidelberg: Springer (EFI Research Reports, 5).
- SPITTLEHOUSE, D. L.; STEWART, R. B. (2003): Adaptation to climate change in forest management. *BC Journal of Ecosystems and Management* 4 (1-11).
- STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. (2008): Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 890–898.
- STÄHR, F.; PETERS, T. (2000): Hähersaat – Qualität und Vitalität natürlicher Eichenverjüngung im nordostdeutschen Tiefland. *AFZ – Der Wald* 55 (23): 1231–1234
- STÄHR, F. (2007): Eiche unter Kiefer. Perspektiven im nordostdeutschen Tiefland. *AFZ – Der Wald* 62 (10): 514–517.
- STÄHR, F.; HAINKE, K. (2009): Kronen- und Zuwachsentwicklung der Kiefer in Abhängigkeit von Soziologie und Standraum am Beispiel der Versuchsanlage Berliner Forsten. In: MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (Hg.): *Wissenstransfer in die Praxis. Beiträge zum 4. Winterkolloquium am 26. Februar 2009 in Eberswalde*. Druckhaus Eberswalde (Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, 40): 30–38.
- STERBA, H. (1996): Forest Decline and Growth Trends in Central Europe - a Review. In: H. Spiecker, K. Mielikäinen, M. Köhl und J.P Skovsgaard (Hg.): *Growth Trends in European Forests*. Berlin, Heidelberg: Springer (EFI Research Reports, 5): 149–165.
- STONE, A. C.; GEHRING, C. A.; WHITHAM, T. G. (2010): Drought negatively affects communities on a foundation tree: growth rings predict diversity. *Oecologia* (164): 751–761.
- STREIT, B.; BÖHNING-GASE, K.; MOSBRUGER, V. (2011): Eine globale Herausforderung und ein Forschungszentrum - Biodiversität und Klima: Wandel im vollen Gange! *Biologie in unserer Zeit* (4): 248–254.

- SUCCOW, F.; SCHRÖDER, J.; BÄUCKER, E.; ELMER, M.; FROMMHOLD, H.; LANGE, M. (2009): Grundlagen und Forschungsfragen. In: M. Elmer, R. Kätzel, O. Bens, C. -T Bues, H. Sonntag und R. F. Hüttl (Hg.): Nachhaltige Bewirtschaftung von Eichen-Kiefern-Mischbeständen. München: oekom: 17–29.
- SWIDRAK, I.; GRUBER, A.; KOFLER, A.; OBERHUBER, W. (2011): Effects of environmental conditions on onset of xylem growth in *Pinus sylvestris* under drought. *Tree Physiology* 31: 483–493.
- TESCHE, M. (1991): Streß und Decline bei Waldbäumen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 110 (1): 56–65.
- THOMAS, F. M.; BLANK, R.; HARTMANN, G. (2002): Abiotic and biotic factors and their interactions as causes of oak decline in Central Europe. *Forest Pathology* 32: 277–307.
- THOMAS, F. M.; BÜTTNER, G. (1998): Nutrient relations in healthy and damaged stands of mature oaks on clayey soils: two case studies in northwestern Germany. *Forest Ecology and Management* 108 (1-2): 301–319.
- THOMAS, H. (1992): Naturgemäße Waldwirtschaft in Sachsen - gestern, heute und in Zukunft. *Der Dauerwald* (6): 4–29.
- THOMAS, H. (1992): Prinzipien eines ökologisch orientierten Waldbaus. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 111: 141–155.
- THOMAS, H. (1996): Geschichte, Anliegen und Wege des Waldumbaus in Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Forsten (6): 11–52.
- TISCHLER, W. (1993): Einführung in die Ökologie. 4. Aufl. Stuttgart: Spektrum akademischer Verlag / Gustav Fischer.
- TRAMPLER, T.; KLICZKOWSKA, A.; DMYTRENKO, E.; SIERPIŃSKA, A. (1990): Regionalizacja przyrodno-leśna na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. Naturräumlich-forstliche Regionalisierung anhand ökologisch-physiografischer Merkmale. In Polnisch. Warschau: PWRiL.
- TREYDTE, K. S. (2003): Dendro-Isotope und Jahrringbreiten als Klimaproxy der letzten 1200 Jahre im Karakorumgebirge/Pakistan. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH (38).
- TURNER, B. L.; KASPERSON, R. E.; MATSON, P. A.; MCCARTHY, J. J.; CORELL, R. W.; CHRISTENSEN, L.; ECKLEY, N.; KASPERSON, J. X.; LUERS, A.; MARTELLO, M. L.; POLSKY, C.; PULSIPHER, A.; SCHILLER, A. (2003): A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (14): 8074–8079.
- UFNALSKI, K.; SIWECKI, R. (2000): Dendrochronological analysis of radial growth dynamics of oaks in the Smolarz forest district. In: T. Oszako und C. Delatour (Hg.): Recent advances on oak health in Europe. Selected papers from a conference held in Warsaw, Poland, 22-24 November 1999. Warschau: 259–266.
- ULRICH, B. (1991): Folgerungen aus 10 Jahren Waldökosystem- und Waldschadensforschung. *Forst und Holz* 46: 575–588.
- UMWELTBUNDESAMT (2006): Hintergrundpapier "Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Szenarien und nationale Aufgaben". Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau.
- UMWELTBUNDESAMT (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen. Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG: Hintergrundpapier. Dessau.
- UTSCHIG, H.; HERLING, H.; PRETZSCH, H. (2006): Veränderte Umweltbedingungen schaffen 13 Prozent mehr Wachstum. *LWF aktuell* (52): 44–46.
- VAGANOV, E. A.; HUGHES, M. K.; SHASHKIN, A. V. (2006): Growth Dynamics of Conifer Tree Rings. Images of Past and Future Environments. Berlin Heidelberg: Springer (Ecological Studies, 183).
- VANCLAY, J. K. (1994): Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. Wallingford and New York: CABI Publishing.
- VIEIRA, J.; CAMPELO, F.; NABAIS, C. (2010): Intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* are a record of climatic changes in the western Mediterranean region. *Canadian Journal of Forest Research* 40: 1567–1575.
- VINS, B. (1963): Tree-ring Studies in Czechoslovakia. *Communicationes Instituti forestalis Cechoslovakiae* 3: 192–196.
- VINS, B.; POLLANSCHÜTZ, J. (1977): Erkennung und Beurteilung immissionsgeschädigter Wälder an Hand von Jahrringanalysen. *Allgemeine Forstzeitung* 88 (6): 146–148.
- WAGNER, S. (2004): Klimawandel - einige Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *Forst und Holz* 59 (8): 394–398.
- WAGNER, S. (2008): Klimawandel - Überlegungen zu waldbaulichen Strategien. *AFZ - DerWald* 63 (20): 1104–1107.
- WALTHER, G. -R.; POST, E.; CONVEY, P.; MENZEL, A.; PARMESAN, C.; BEEBEE, T. J. C.; FROMENTIN, J. -M.; HOEGH-GULDBERG, O.; BAIRLEIN, F. (2002): Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416: 389–395.
- WARGO, P. M. (1996): Consequences of environmental stress on oak: predisposition to pathogens. *Annals of Forest Science* 53 (2-3): 359–368.

- WENK, G.; ANTANAITIS, V.; SMELKO, S. (1990): Waldertragslehre. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- WERF, G. W. v. D.; SASS-KLAASSEN, U. G. W.; MOHREN, G. M. J. (2007): The impact of the 2003 summer drought on the intra-annual growth pattern of beech (*Fagus sylvatica* L.) and oak (*Quercus robur* L.) on a dry site in the Netherlands. *Dendrochronologia* 25 (2): 103–112.
- WHITE, T. C. R. (2009): Plant vigour versus plant stress: a false dichotomy. *Oikos* 118: 807–808.
- WHITEHEAD, D. (2011): Modelling the impacts of pests on forest productivity: a pathway through complexities and conundrums. *Tree Physiology* 31: 683–685.
- WIGLEY, T. M. L.; BRIFFA, K. R.; JONES, P. D. (1984): On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23: 201–213.
- WILSON, R.; D'ARRIGO, R.; BUCKLEY, B.; BÜNTGEN, U.; ESPER, J.; FRANK, D.; LUCKMAN, B.; PAYETTE, S.; VOSE, R.; YOUNGBLUT, D. (2007): A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. *Journal of Geophysical Research* 112 (D17103): doi:10.1029/2006JD008318.
- WOHLGEMUTH, T. (Hg.) (2006): Wald und Klimawandel. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Birmensdorf (Forum für Wissen).
- WOODWARD, F. I. (1987): Climate and plant distribution. Cambridge studies in ecology. Cambridge: Cambridge University Press.
- WRIGHT, E. L.; ERICKSON, J. D. (2003): Incorporating catastrophes into integrated assessment: science, impacts, and adaptations. *Climatic Change* 57: 265–286.
- WYKOFF, W. R. (1990): A basal area increment model for individual conifers in the Northern Rocky Mountains. *Forest Science* 36 (4): 1077–1104.
- YUE, C.; KOHNLE, U.; HANEWINKEL, M.; KLÄDTKE, J. (2011): Extracting environmentally driven growth trends from diameter increment series based on a multiplicative decomposition model. *Canadian Journal of Forest Research* 41 (8): 1577–1589.
- ZANG, C. (2009): bootRes: Bootstrapped response and correlation functions. R package and manual. Online verfügbar unter <http://cran.r-project/web/packages/bootRes/>.
- ZANG, C.; BIONDI, F. (2012): Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia* 30 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.001>). Online verfügbar unter <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1125786512000586>.
- ZANG, C.; ROTHE, A.; PRETZSCH, H. (2011): Zur Baumarteneignung bei Klimawandel: Ableitung der Trockenstressanfälligkeit wichtiger Baumarten aus Jahrringbreiten. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 182 (5/6): 98–112.
- ZANG, C.; PRETZSCH, H.; ROTHE, A. (2012): Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. *Trees* 26: 557–569.
- ZHANG, S. Y. (1997): Variations and correlations of various ring width and ring density features in European oak: implications in dendroclimatology. *Wood Science and Technology* 31 (1): 63–72.
- ZIEGLER, C. (2006): Elementgehalte in Blättern des Maitriebes und der Regenerationsbelaubung bei Eiche. *AFZ – Der Wald* 61 (11): 599–602.
- ZIMMERMANN, R. D. (1996): Begriffsdefinitionen zur Bioindikation. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung - Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 8 (3): 169–171.

8 Anhang

8.1	Waldwachstumskundliche Kennwerte der Kernflächen.....	245
8.2	Lage und weitere Eigenschaften der Versuchsflächen	245
8.3	Jahrringbreiten des herrschenden und beherrschten Bestandes (Kernflächen).....	246
8.4	Jahrringindizes des herrschenden und beherrschten Bestandes (Kernflächen).....	247
8.5	Korrelationen zwischen Zusatzflächen-Zeitreihen des mittleren Jahrringindex.....	248
8.6	Witterung im Zeitraum 1951-2006 (Messwerte / Referenz) und 2007-2060	249
8.7	Korrelationen zwischen Monatsmitteltemperaturen und Jahrringindizes auf den Kernflächen	250
8.8	Signifikante Korrelationen der Monatswerte von Niederschlag und Temperatur mit den Jahrringindizes auf den ausgewählten Zusatzflächen	251
8.9	Korrelationskoeffizienten zwischen Monats-Witterungsparametern und Jahrringindizes für Kern- und Zusatzflächen 1951-2006	252
8.10	Korrelationskoeffizienten zwischen Witterung und Jahrringindizes in <i>moving windows</i> für den beherrschten Bestand (Sozialklasse 3+4) der Kernflächen	254
8.11	Korrelationskoeffizienten zwischen Witterung und Jahrringindizes in <i>moving windows</i> für ausgewählte Zusatzflächen	255
8.12	Signifikante Korrelationen monatlicher Witterung mit dem Jahrringindex in <i>moving windows</i> für Kernflächen, beherrschter Bestand, und Zusatzflächen	256
8.13	Signifikant mit dem Jahrringindex korrelierte Perioden von Temperatur und Niederschlag für die Kernflächen	257
8.14	Signifikant mit dem Jahrringindex korrelierte Witterungsperioden für die Kernflächen: Vergleich von Beginn und Ende des Untersuchungszeitraums	258
8.15	Signifikant mit dem Jahrringindex korrelierte Witterungsperioden für die Zusatzflächen: Vergleich von Beginn und Ende des Untersuchungszeitraums	259
8.16	Vergleich der Jahrringindex-Abweichung im Szenariozeitraum 2001-2055 für Modell-Zeitreihen des Jahrringindex bei unterschiedlicher Kalibrierung	260

8.1 Waldwachstumskundliche Kennwerte der Kernflächen

Tab. 8-20: Waldwachstumskundliche Grunddaten der Kernflächen (Stand: 01.01.2006; vgl. ELMER et al. 2009)

Fl./BA	Alter [a]	DG [cm]	DO [cm]	HG [m]	HO [m]	Nha	Gha [m ²]	VDha [m ³]	RBon	ABon [m]	BG
K1/GKI	140	45,1	45,1	28,2	28,1	100	16,0	199	1,6	25,5	0,45
K1/TEI	140	40,0	43,0	24,5	24,5	124	15,6	203	2,74	20,6	0,63
K2/GKI	177	46,8	46,8	27,4	27,4	93	16,0	193	2,2	25,0	0,46
K2/TEI	91-200	42,7	46,1	24,5	24,9	131	18,7	243	1,4-3,3	26-23,2	0,75
K3/GKI	121	40,6	40,8	27,0	27,2	52	6,7	81	1,7	25,3	0,2
K3/TEI	125	34,7	45,6	29,2	31,2	287	27,1	407	1,2	26,6	1,02
K4/GKI	110	40,1	40,1	27,7	27,7	71	9,0	109	1,8	26,6	0,23
K4/TEI	110	34,6	37,1	26,3	26,9	152	14,3	190	1,6	25,2	0,55
K5/GKI	120	38,2	37,8	24,1	24,2	107	11,6	126	2,4	22,4	0,34
K5/TEI	120	36,7	39,9	23,4	23,5	121	12,9	156	2,6	21,2	0,52

Mit Fl. = Versuchsfläche, BA = Baumart, GKI = Gemeine Kiefer, TEI = Trauben-Eiche, DG = Grundflächenmitteldurchmesser, DO = Oberdurchmesser (D 10 %), HG = Grundflächenmittelhöhe, HO = Oberhöhe, Nha = Stammzahl je Hektar, Gha = Grundfläche je Hektar, VDha = Derbholzvolumen je Hektar, RBon = relative Bonität, ABon = absolute Bonität, BG = Bestockungsgrad nach grundflächenbezogener Anteilfläche (Bonitäten und Bestockungsgrade nach den Ertragstafeln ERTELD (1963, Hochdurchforstung) für Eiche und LEMBCKE et al. (1975) für Kiefer)

8.2 Lage und weitere Eigenschaften der Versuchsflächen

Tab. 8-21: Geographische Koordinaten, Bestockungsgrad und Humusform der Kernflächen (Stand: 01.01.2006; vgl. ELMER et al. 2009).

Fläche	RW	HW	H über NN [m]	BG	Humusform
K1	310370	5856889	50	1,1	Rohhumusartiger Moder
K2	399744	5738515	135	1,2	Rohhumusartiger Moder
K3	464458	5782597	70	1,2	Mullartiger Moder bis F-Mull
K4	705354	5674608	200	0,8	Typischer Moder
K5	939383	5621459	230	0,9	F-Mull

RW / HW = Rechtswert / Hochwert im UTM-Koordinatensystem, Streifen 33U / ETRS89; H = Höhe; BG = kombinierter Bestockungsgrad mit Bezug auf die Ertragstafeln nach ERTELD (1963, Hochdurchforstung) für Eiche und LEMBCKE et al. (1975) für Kiefer)

8.3 Jahrringbreiten des herrschenden und des beherrschten Bestandes der Kernflächen

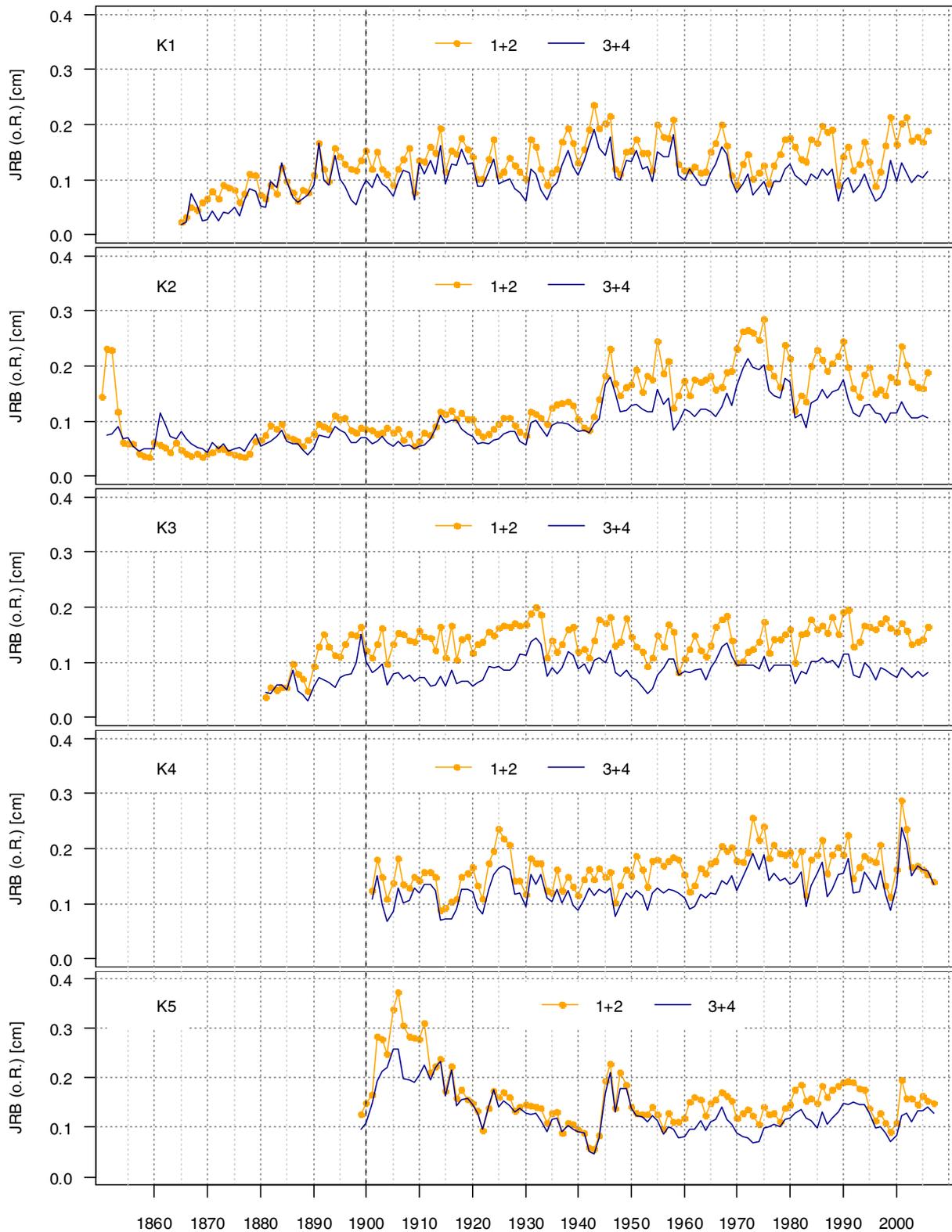


Abb. 8-100: Jahrringbreiten ohne Rinde (JRB o. R.) für den herrschenden (Stammklassen 1+2) und den beherrschten Bestand (Stammklassen 3+4) auf den Kernflächen K1-K5

8.4 Jahringindizes des herrschenden und des beherrschten Bestandes der Kernflächen

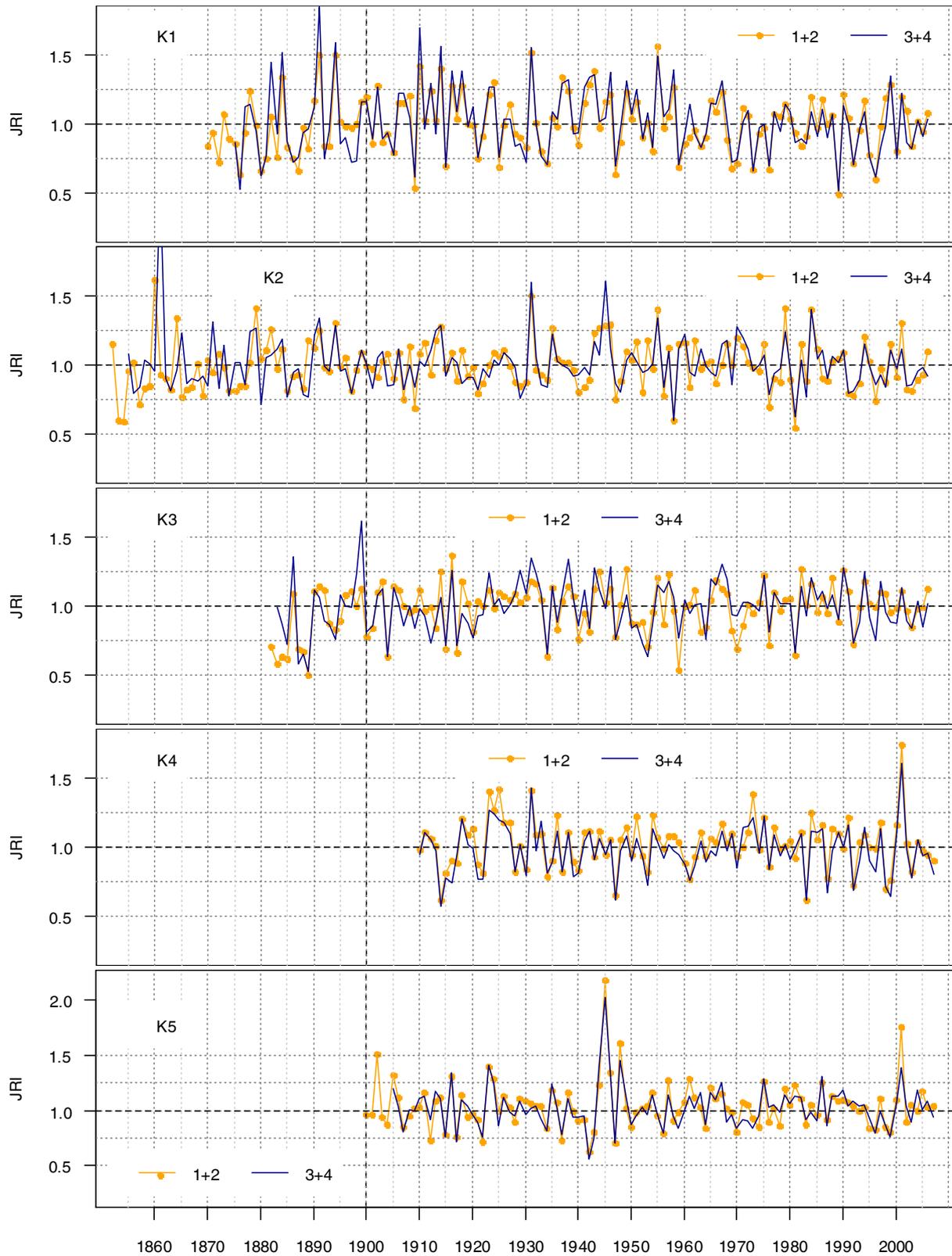


Abb. 8-101: Jahringindizes (JRI, dimensionslos) für den herrschenden (Stammklassen 1+2) und den beherrschten Bestand (Stammklassen 3+4) auf den Kernflächen K1-K5

8.6 Witterung im Zeitraum 1951-2006 (Messwerte / Referenz) und 2007-2060 (Szenario- daten nach dem Regionalmodell STAR 2)

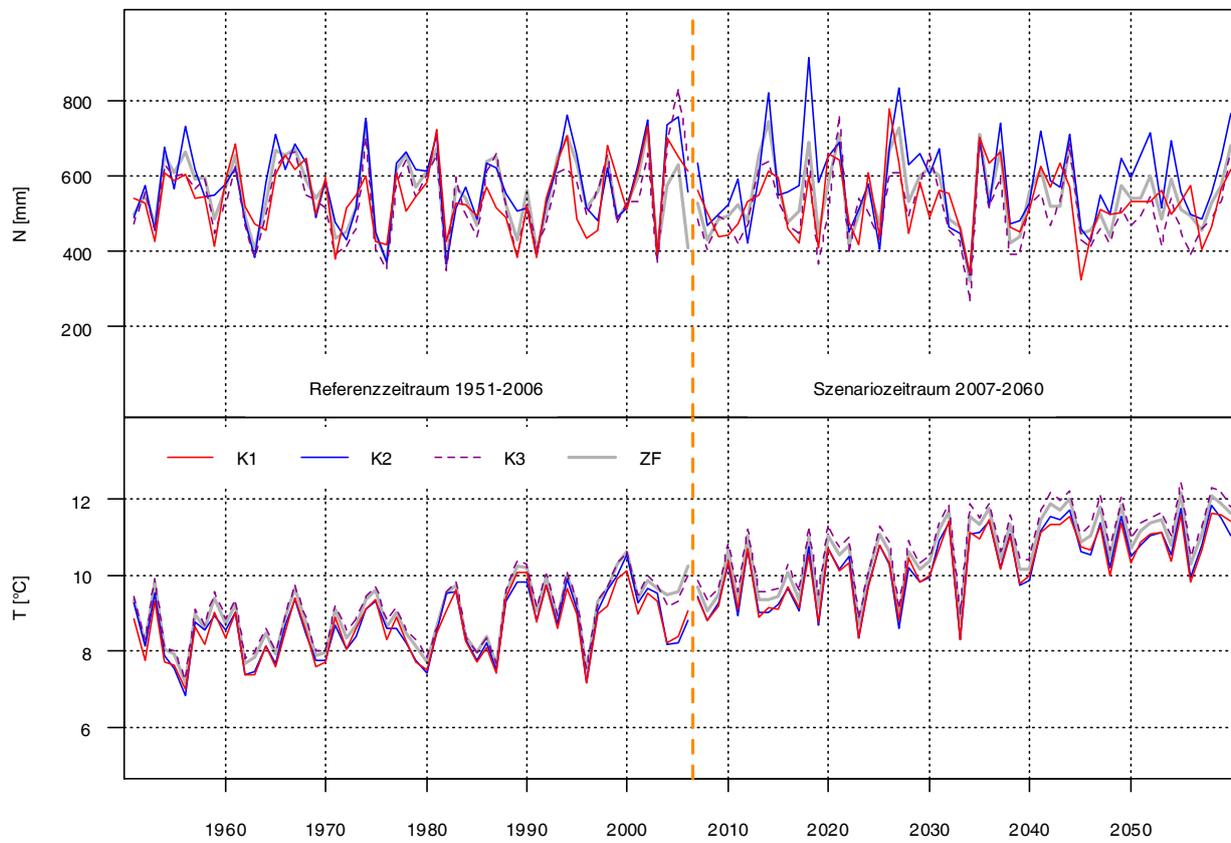


Abb. 8-102: Verlauf der Jahresniederschlagssummen (N) und der Jahresmitteltemperaturen (T) nach den Messwerten im Referenzzeitraum 1951-2006 sowie nach der Median-Realisierung des 2-K-Szenarios von STAR 2 auf Basis der ECHAM-5-Daten für das SRES-Szenario A1B für den Zeitraum 2007-2060 für die Kernflächen K1-K3 sowie für das Mittel der Zusatzflächen (ZF). Zu beachten ist, dass beide Ordinaten nicht bei 0 beginnen.

8.7 Korrelationen zwischen Monatsmitteltemperaturen und Jahrringindizes auf den Kernflächen

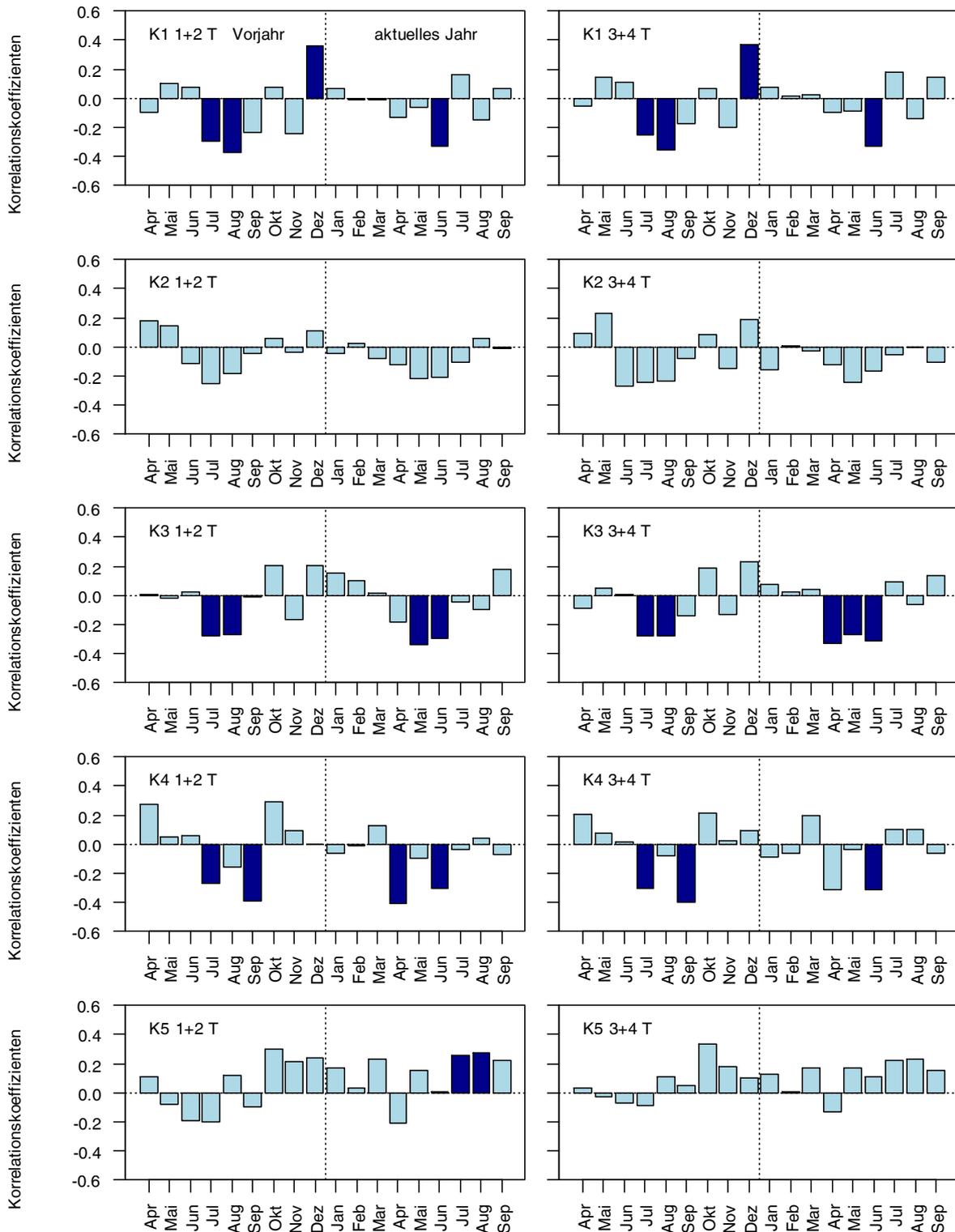


Abb. 8-103: Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen Monatsmitteltemperaturen (T) und Jahrringindex auf den Kernflächen für den Zeitraum 1951-2006 (CIN) für den herrschenden Bestand (1+2, links) und den beherrschten Bestand (3+4), berechnet mit *bootRes* (ZANG 2009). Signifikante Korrelationskoeffizienten sind dunkelblau hervorgehoben.

8.8 Signifikante Korrelationen der Monatswerte von Niederschlag und Temperatur mit den Jahrringindizes auf den ausgewählten Zusatzflächen

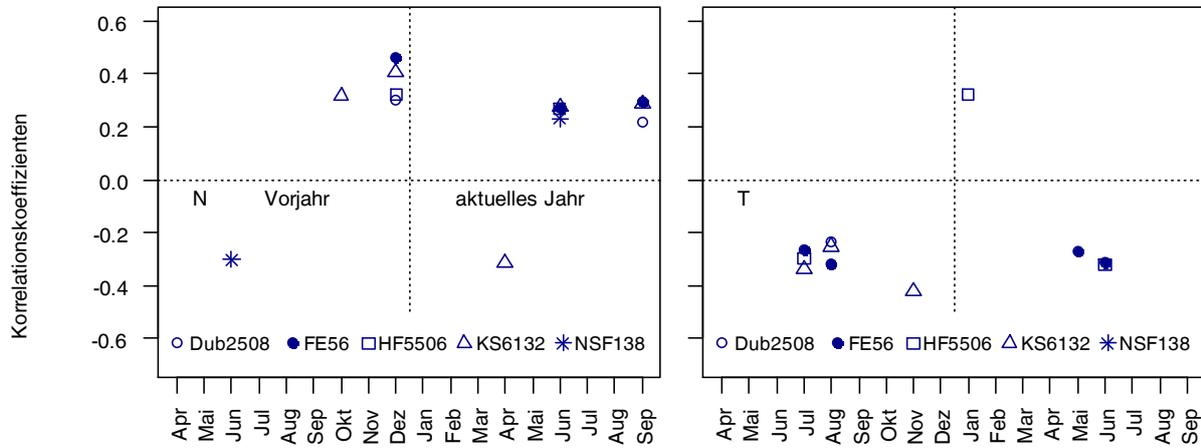


Abb. 8-104: Statistisch signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen Monatswerten von Niederschlag (N, links) und Temperatur (T) im Zeitraum 1951-2006, dargestellt für ausgewählte Zusatzflächen

8.9 Zahlenwerte der Korrelationskoeffizienten zwischen Monats-Witterungsparametern und Jahrringindizes für Kern- und Zusatzflächen für das CIN 1951-2006

Korrelationskoeffizienten JRI – Monatsniederschlagssummen																		
Monate	Vorjahr									aktuelles Jahr								
	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
K1.12	0,08	-0,05	0,04	0,32	0,14	0,23	0,00	-0,10	0,50	0,21	0,26	0,30	0,01	0,01	0,42	0,04	0,11	0,27
K1.34	-0,03	-0,09	0,08	0,33	0,14	0,22	0,08	-0,09	0,51	0,21	0,29	0,30	0,00	0,07	0,42	0,01	0,08	0,29
K2.12	0,06	0,18	-0,26	0,10	0,43	0,01	0,12	-0,05	0,18	-0,23	0,06	0,07	0,11	-0,07	0,13	-0,11	-0,11	0,08
K2.34	0,06	0,05	-0,16	0,23	0,35	-0,05	0,06	-0,02	0,24	-0,25	0,05	0,14	0,06	-0,04	0,09	-0,04	-0,10	0,12
K3.12	-0,04	0,07	-0,02	0,26	0,23	0,18	0,19	0,01	0,51	-0,12	0,35	0,01	-0,10	0,00	0,24	0,04	0,26	0,32
K3.34	-0,06	0,00	-0,08	0,33	0,20	0,23	0,18	-0,16	0,53	-0,11	0,20	0,08	0,06	0,00	0,19	-0,04	0,25	0,29
K4.12	-0,04	0,13	-0,06	0,08	0,06	0,23	-0,12	-0,05	0,04	-0,40	-0,27	-0,08	0,09	-0,09	0,07	0,25	0,08	0,10
K4.34	0,04	0,15	-0,03	0,11	0,05	0,10	-0,07	-0,08	0,07	-0,32	-0,32	-0,05	0,15	-0,06	0,21	0,14	0,11	0,03
K5.12	0,14	-0,03	0,01	0,30	-0,07	0,05	0,21	0,29	0,16	0,17	-0,22	0,12	0,35	0,12	-0,08	0,19	-0,37	-0,22
K5.34	0,32	0,02	0,05	0,40	-0,13	-0,10	0,14	0,31	0,25	0,33	-0,06	0,15	0,31	0,10	-0,16	0,13	-0,26	-0,22

Korrelationskoeffizienten JRI – Monatsmitteltemperaturen																		
Monate	Vorjahr									aktuelles Jahr								
	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
K1.12	-0,10	0,10	0,08	-0,30	-0,37	-0,24	0,07	-0,24	0,37	0,07	-0,01	-0,01	-0,13	-0,06	-0,33	0,16	-0,15	0,07
K1.34	-0,05	0,14	0,11	-0,25	-0,35	-0,17	0,07	-0,20	0,37	0,08	0,02	0,03	-0,10	-0,08	-0,33	0,18	-0,14	0,15
K2.12	0,18	0,14	-0,12	-0,25	-0,18	-0,04	0,06	-0,04	0,11	-0,05	0,02	-0,08	-0,12	-0,21	-0,20	-0,10	0,06	-0,01
K2.34	0,09	0,23	-0,27	-0,24	-0,24	-0,07	0,09	-0,15	0,19	-0,15	0,01	-0,03	-0,12	-0,24	-0,16	-0,05	0,00	-0,10
K3.12	0,01	-0,01	0,03	-0,28	-0,27	-0,01	0,21	-0,17	0,20	0,16	0,10	0,01	-0,19	-0,34	-0,29	-0,04	-0,09	0,18
K3.34	-0,08	0,05	0,01	-0,28	-0,28	-0,14	0,19	-0,13	0,23	0,07	0,03	0,04	-0,33	-0,26	-0,31	0,10	-0,06	0,13
K4.12	0,28	0,05	0,06	-0,26	-0,15	-0,39	0,29	0,09	0,00	-0,06	-0,01	0,13	-0,41	-0,10	-0,30	-0,04	0,04	-0,07
K4.34	0,21	0,07	0,02	-0,30	-0,08	-0,39	0,22	0,02	0,09	-0,08	-0,06	0,20	-0,31	-0,04	-0,31	0,11	0,10	-0,06
K5.12	0,11	-0,08	-0,19	-0,20	0,12	-0,10	0,30	0,21	0,24	0,17	0,03	0,23	-0,21	0,16	0,01	0,25	0,27	0,22
K5.34	0,03	-0,03	-0,07	-0,09	0,11	0,05	0,34	0,18	0,10	0,13	0,01	0,17	-0,13	0,17	0,11	0,23	0,23	0,15

Response-function-Werte JRI – Monatsniederschlagssummen																		
Monate	Vorjahr									aktuelles Jahr								
	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
K1.12	0,06	0,01	-0,03	0,13	0,10	0,15	-0,07	-0,03	0,32	0,05	0,16	0,15	0,06	0,04	0,23	0,03	0,03	0,15
K1.34	-0,02	-0,03	-0,02	0,15	0,09	0,13	-0,01	-0,02	0,31	0,05	0,17	0,16	0,05	0,09	0,22	0,02	0,00	0,20
K2.12	0,01	0,14	-0,18	0,03	0,30	-0,04	0,05	-0,02	0,12	-0,24	0,06	0,07	0,09	-0,06	0,07	-0,09	-0,03	0,10
K2.34	0,00	0,04	-0,09	0,14	0,27	-0,08	-0,01	0,01	0,16	-0,26	0,01	0,10	0,06	-0,02	0,03	-0,06	-0,06	0,13
K3.12	-0,07	0,06	0,04	0,12	0,13	0,04	0,15	0,01	0,36	-0,17	0,22	-0,08	-0,12	0,03	0,13	-0,02	0,11	0,20
K3.34	-0,04	-0,02	-0,05	0,17	0,12	0,07	0,15	-0,09	0,34	-0,18	0,11	-0,02	0,00	0,05	0,10	-0,08	0,11	0,19
K4.12	-0,03	0,07	-0,07	0,07	0,02	0,14	-0,02	-0,04	0,00	-0,26	-0,24	-0,08	-0,01	-0,03	0,06	0,20	0,06	0,04
K4.34	0,03	0,09	-0,05	0,14	0,01	0,04	-0,01	-0,06	-0,01	-0,22	-0,32	-0,04	0,08	-0,01	0,13	0,12	0,09	-0,08
K5.12	0,13	-0,08	-0,13	0,17	-0,07	0,07	0,15	0,20	0,12	0,04	-0,21	0,05	0,27	0,06	-0,19	0,11	-0,27	-0,11
K5.34	0,26	-0,03	-0,12	0,23	-0,14	-0,01	0,10	0,22	0,15	0,16	-0,14	0,00	0,25	0,01	-0,27	0,08	-0,15	-0,11

Response-function-Werte JRI – Monatsmitteltemperaturen																		
Monate	Vorjahr									aktuelles Jahr								
	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
K1.12	-0,08	0,09	0,12	-0,11	-0,22	-0,12	0,09	-0,17	0,23	0,04	0,07	-0,04	-0,08	0,05	-0,23	0,14	-0,08	0,02
K1.34	-0,04	0,12	0,13	-0,08	-0,22	-0,08	0,09	-0,15	0,22	0,03	0,07	-0,04	-0,08	0,01	-0,22	0,14	-0,09	0,08
K2.12	0,20	0,14	-0,08	-0,13	-0,07	-0,01	0,03	-0,02	0,12	-0,05	0,08	-0,08	-0,05	-0,17	-0,12	-0,08	0,15	-0,04
K2.34	0,12	0,24	-0,17	-0,12	-0,09	-0,04	0,08	-0,09	0,18	-0,16	0,07	-0,06	-0,04	-0,20	-0,07	-0,02	0,11	-0,12
K3.12	0,05	-0,01	0,04	-0,10	-0,15	0,08	0,19	-0,14	0,10	0,13	0,13	-0,01	-0,11	-0,24	-0,22	-0,02	-0,01	0,15
K3.34	-0,04	0,08	0,05	-0,09	-0,15	-0,02	0,18	-0,09	0,13	0,08	0,07	0,00	-0,22	-0,15	-0,21	0,10	0,00	0,09
K4.12	0,33	0,03	0,03	-0,11	-0,06	-0,18	0,16	0,04	0,01	0,06	0,04	0,08	-0,28	-0,01	-0,18	-0,01	0,08	-0,07
K4.34	0,19	0,06	-0,03	-0,15	0,01	-0,22	0,12	0,02	0,08	-0,01	-0,03	0,11	-0,21	0,04	-0,19	0,13	0,14	-0,13
K5.12	0,07	-0,07	-0,09	-0,13	0,15	-0,02	0,21	0,19	0,18	0,04	0,03	0,13	-0,19	0,08	-0,02	0,11	0,13	0,16
K5.34	-0,03	-0,02	0,01	-0,07	0,11	0,10	0,27	0,19	0,09	0,04	0,00	0,13	-0,14	0,08	0,02	0,08	0,10	0,12

Korrelationskoeffizienten JRI – Monatsniederschlagssummen																		
Monate	Vorjahr										aktuelles Jahr							
	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
D2508	-0,22	0,10	-0,15	0,17	0,17	0,20	0,02	-0,13	0,30	-0,04	0,19	0,00	-0,03	-0,13	0,19	-0,10	0,14	0,22
FE56	-0,16	0,14	-0,04	0,31	0,09	0,22	0,09	-0,01	0,47	-0,16	0,30	-0,04	-0,12	-0,04	0,27	0,06	0,11	0,30
H5506	-0,01	0,01	-0,10	0,15	-0,07	0,20	0,18	-0,02	0,32	-0,13	0,17	-0,05	-0,19	-0,09	0,27	-0,09	0,09	0,20
K6132	0,12	0,02	-0,02	0,17	0,25	0,21	0,32	0,04	0,41	-0,08	0,14	0,06	-0,32	-0,07	0,28	0,05	-0,15	0,29
NS138	0,00	0,20	-0,30	-0,11	0,27	0,15	0,10	0,00	0,12	-0,21	0,04	-0,05	0,06	0,02	0,23	0,04	-0,09	0,12
Response-function-Werte JRI – Monatsniederschlagssummen																		
D2508	-0,19	0,11	-0,13	0,10	0,14	0,08	0,01	-0,07	0,20	-0,01	0,11	0,00	-0,02	-0,11	0,08	-0,11	0,11	0,20
FE56	-0,18	0,16	0,02	0,17	0,05	0,06	0,06	0,01	0,31	-0,12	0,15	-0,04	-0,10	0,00	0,15	0,01	0,07	0,26
H5506	0,00	0,07	-0,06	0,07	-0,10	0,10	0,15	-0,05	0,21	-0,12	0,06	-0,03	-0,15	-0,04	0,14	-0,12	0,09	0,17
K6132	0,03	0,08	0,05	0,08	0,13	0,10	0,17	0,00	0,26	-0,12	0,07	0,04	-0,22	0,01	0,16	-0,01	-0,08	0,22
NS138	-0,01	0,14	-0,23	-0,11	0,16	0,04	0,07	-0,02	0,08	-0,17	0,00	-0,01	0,10	0,01	0,15	0,04	-0,05	0,17
Korrelationskoeffizienten JRI – Monatsmitteltemperaturen																		
Monate	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep
D2508	0,12	0,02	-0,05	-0,22	-0,24	-0,01	0,09	-0,11	0,15	0,25	0,03	0,03	-0,12	-0,02	-0,09	0,10	0,02	0,12
FE56	0,09	-0,05	0,02	-0,26	-0,32	-0,10	0,08	-0,15	0,26	0,14	0,17	-0,03	-0,16	-0,27	-0,31	0,04	-0,12	0,16
H5506	-0,03	-0,09	-0,12	-0,30	-0,18	-0,05	0,10	-0,09	0,19	0,32	0,18	0,15	-0,05	-0,09	-0,32	0,04	0,04	-0,01
K6132	0,14	0,00	-0,16	-0,34	-0,25	-0,11	0,05	-0,42	0,19	0,17	0,03	0,18	-0,06	-0,14	-0,20	0,00	-0,09	0,07
NS138	0,25	0,07	0,11	-0,09	-0,05	-0,18	0,03	0,06	0,07	-0,03	-0,02	-0,17	0,00	-0,12	-0,25	-0,25	-0,03	-0,10
Response-function-Werte JRI – Monatsmitteltemperaturen																		
D2508	0,10	0,00	0,00	-0,10	-0,17	0,03	0,06	-0,02	0,09	0,18	0,01	0,00	-0,11	-0,02	-0,05	0,05	0,01	0,04
FE56	0,13	-0,05	0,03	-0,06	-0,20	-0,04	0,08	-0,10	0,15	0,10	0,20	-0,05	-0,09	-0,18	-0,21	0,05	-0,06	0,12
H5506	-0,01	-0,09	-0,06	-0,18	-0,10	-0,02	0,12	-0,03	0,07	0,22	0,12	0,07	-0,01	-0,05	-0,23	0,02	0,05	-0,01
K6132	0,15	-0,01	-0,07	-0,17	-0,12	-0,05	0,04	-0,29	0,08	0,12	0,04	0,08	-0,02	-0,12	-0,14	-0,04	-0,02	0,05
NS138	0,25	0,04	0,03	-0,04	-0,02	-0,13	0,01	0,03	0,08	-0,01	0,03	-0,05	0,04	-0,08	-0,14	-0,17	0,03	-0,08

Mit JRI = Jahrringindex, D2508 = Dub2508, H5506 = HF5506, K6132 = KS6132, NS138 = NSF138

Berechnet in R mit `bootRes` (ZANG 2009)

8.10 Korrelationskoeffizienten zwischen Witterung und Jahrringindizes in *moving windows* für den beherrschten Bestand (Sozialklasse 3+4) der Kernflächen

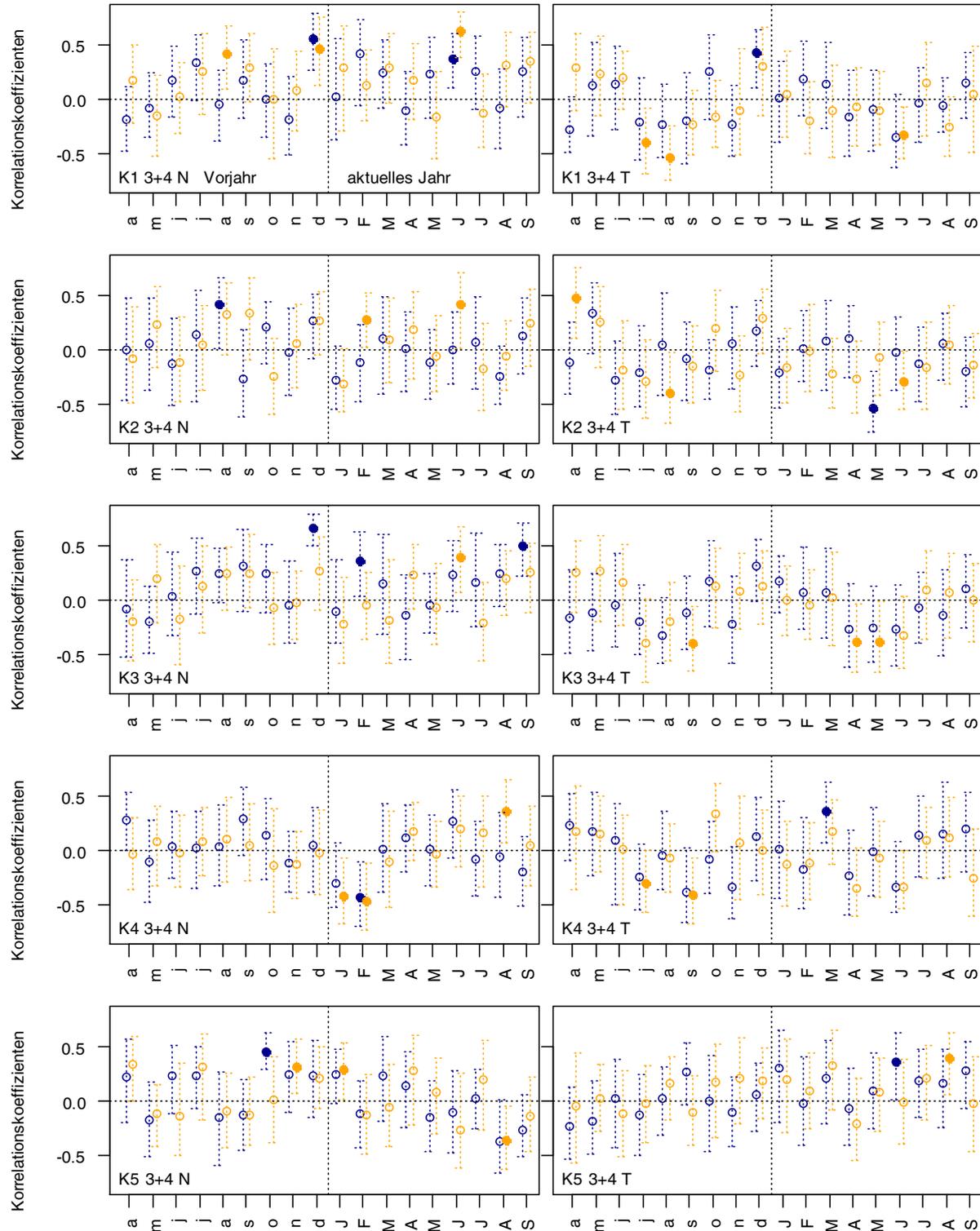


Abb. 8-105: Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen monatlichen Niederschlagssummen (N, links) beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen (T, rechts) und dem Jahrringindex auf den Kernflächen, dargestellt für den beherrschten Bestand (Sozialklasse 3+4), in den Zeiträumen 1951-1984 (dunkelblau) und 1975-2006 (orange). Die senkrechten Linien geben die Konfidenzintervalle an; ausgefüllte Punkte bezeichnen signifikante, nicht ausgefüllte Punkte nicht signifikante Korrelationskoeffizienten. Auf der Abszisse zeigen Kleinbuchstaben die Monate des Vorjahres (April bis Dezember), Großbuchstaben die des Wuchsjahres an.

8.11 Korrelationskoeffizienten zwischen Witterung und Jahringindizes in *moving windows* für ausgewählte Zusatzflächen

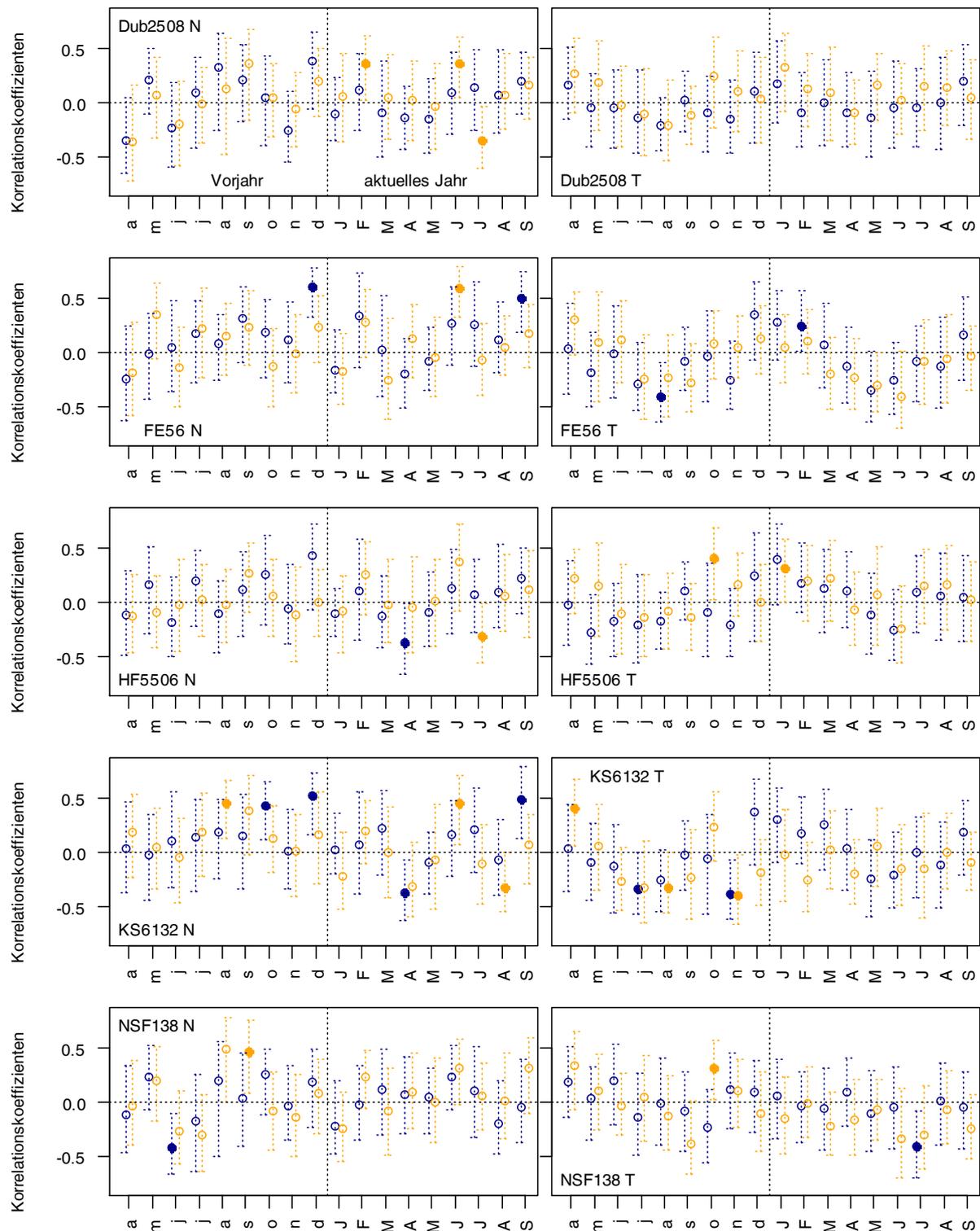


Abb. 8-106: Korrelationskoeffizienten der Beziehung zwischen monatlichen Niederschlagssummen (N, links) beziehungsweise den Monatsmitteltemperaturen (T, rechts) und dem Jahringindex auf ausgewählten Zusatzflächen in den Zeiträumen 1951-1984 (dunkelblau) und 1975-2006 (orange). Die senkrechten Linien geben die Konfidenzintervalle an; ausgefüllte Punkte bezeichnen signifikante, nicht ausgefüllte Punkte nicht signifikante Korrelationskoeffizienten. Auf der Abszisse zeigen Kleinbuchstaben die Monate des Vorjahres (April bis Dezember), Großbuchstaben die des Wuchsjahres an.

8.12 Signifikante Korrelationen monatlicher Witterung mit dem Jahrringindex in *moving windows* für die Kernflächen, beherrschter Bestand, und die Zusatzflächen

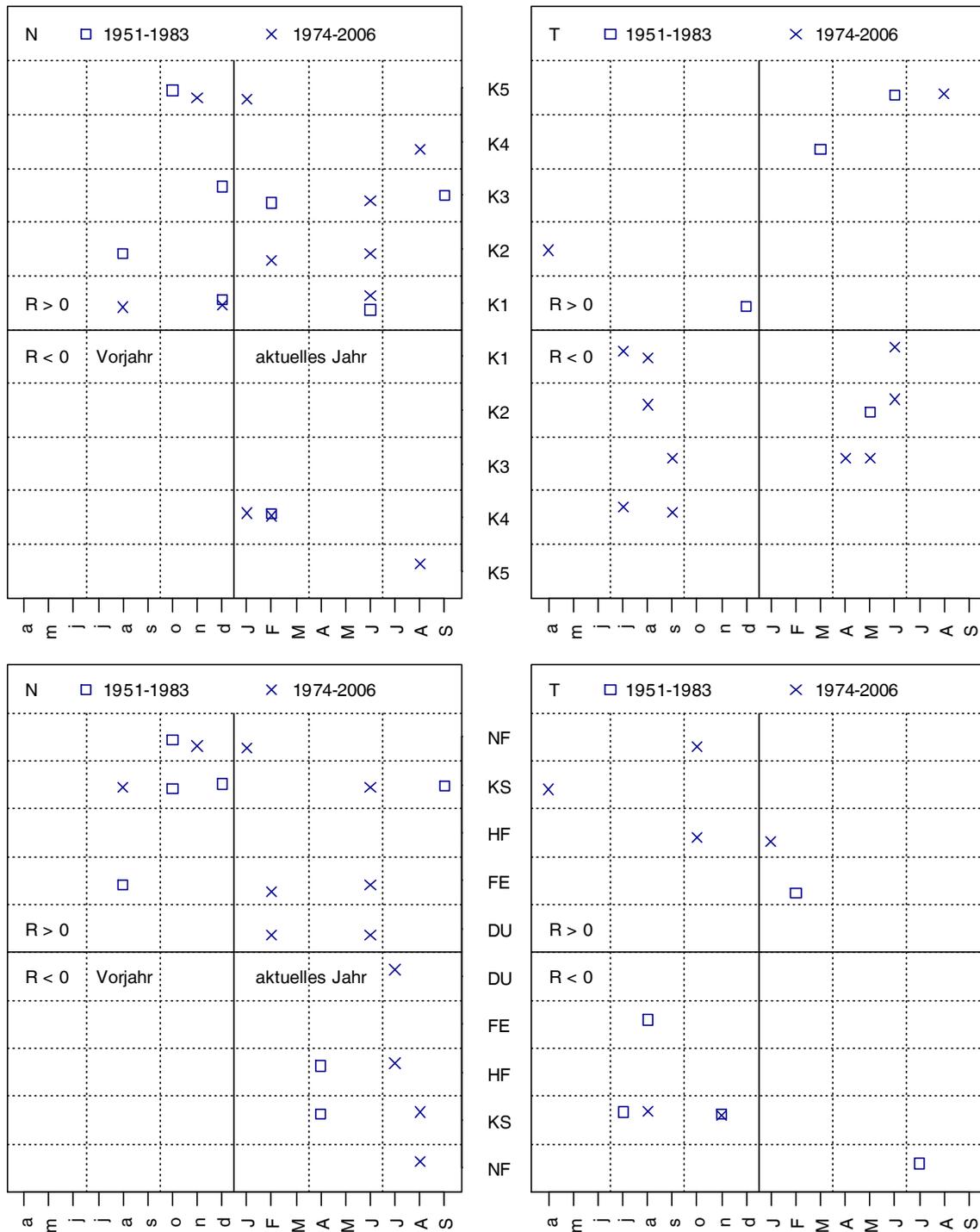


Abb. 8-107: Statistisch signifikante *bootstrapped*-Korrelationskoeffizienten für die Beziehungen zwischen Monatswerten von Niederschlag (N) und Temperatur (T), berechnet in gleitenden 28-Jahres-Intervallen, dargestellt für die Sozialklasse 3+4 auf den Kernflächen (oben) sowie für ausgewählte Zusatzflächen (unten). Unterhalb der waagerechten Trennlinie sind jeweils negative, oberhalb positive Korrelationskoeffizienten aufgetragen. Kleinbuchstaben auf der Abszisse stehen für die Monate April-Dezember des Vorjahres, Großbuchstaben für die Monate Januar-September des Wuchsjahres. Die Flächenkürzel unten bedeuten DU = Dub2508, FE = FE056, HF = HF5506, KS = KS6132, NF = NSF38. Die unterschiedlichen Symbole dienen zur Unterscheidung des Mittels der ersten fünf (1951-1983) vom Mittel der letzten fünf Intervalle (1975-2006), die Lage der Symbole innerhalb der Zeilen gibt ihren Wert zwischen 0 und 1 beziehungsweise zwischen 0 und -1 wieder.

8.13 Signifikant mit dem Jahrringindex korrelierte Perioden von Temperatur und Niederschlag für die Kernflächen

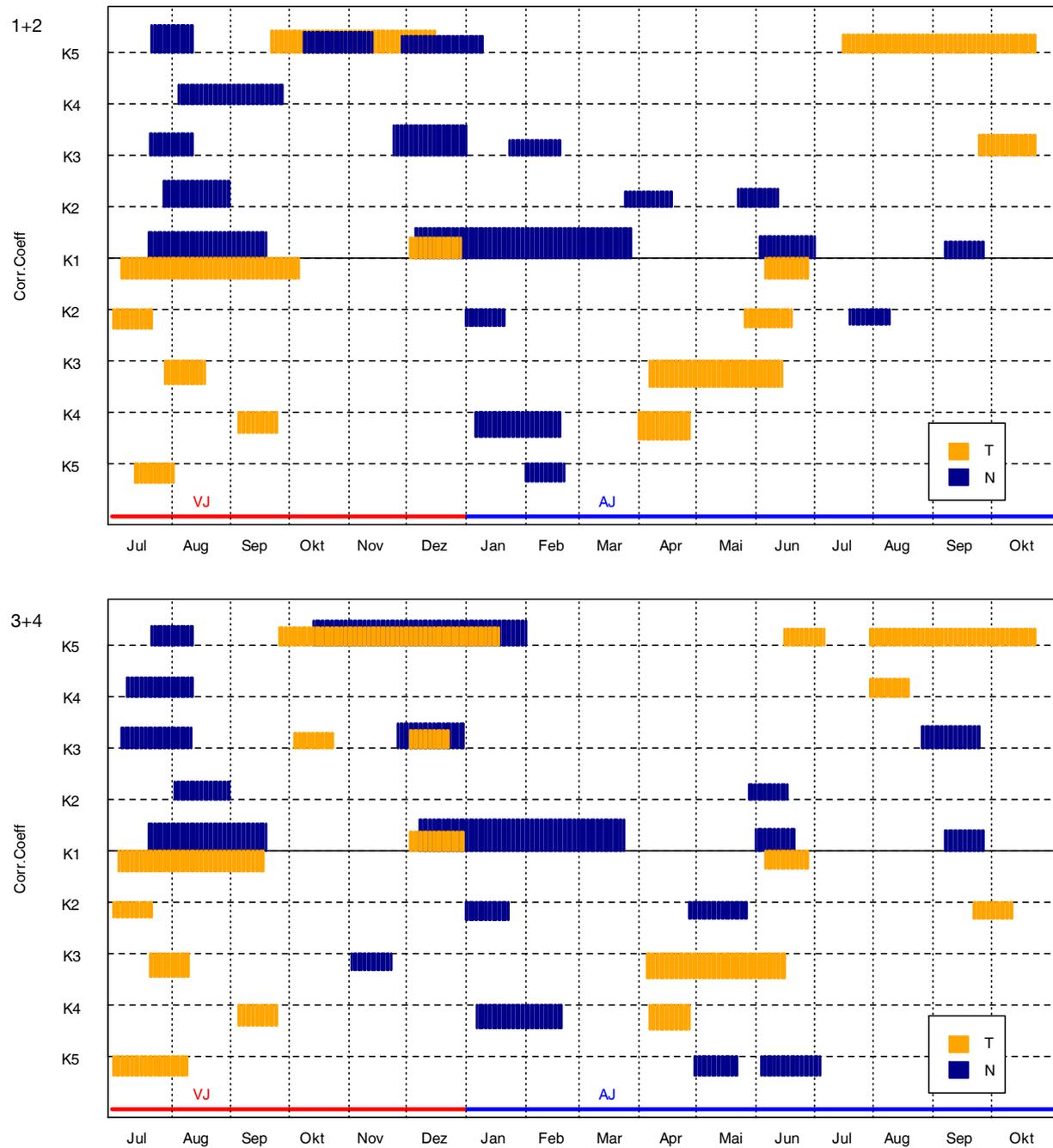


Abb. 8-108: Signifikant mit der Jahrringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres (VJ) bis 31.10. des aktuellen Jahres (AJ) von Temperatur (T) und Niederschlag (N) mit Angabe der entsprechenden Korrelationskoeffizienten (Corr.Coeff) nach Berechnung durch CLIMTREG für die Kernflächen, herrschender (oben) und beherrschter Bestand (unten), Bezug: 1951-2006. Die Höhe der farbigen Flächen über den waagerechten Bezugslinien (Abstand = 1) entspricht den Korrelationskoeffizienten.

8.14 Signifikant mit dem Jahrringindex korrelierte Witterungsperioden für die Kernflächen: Vergleich von Beginn und Ende des Untersuchungszeitraums

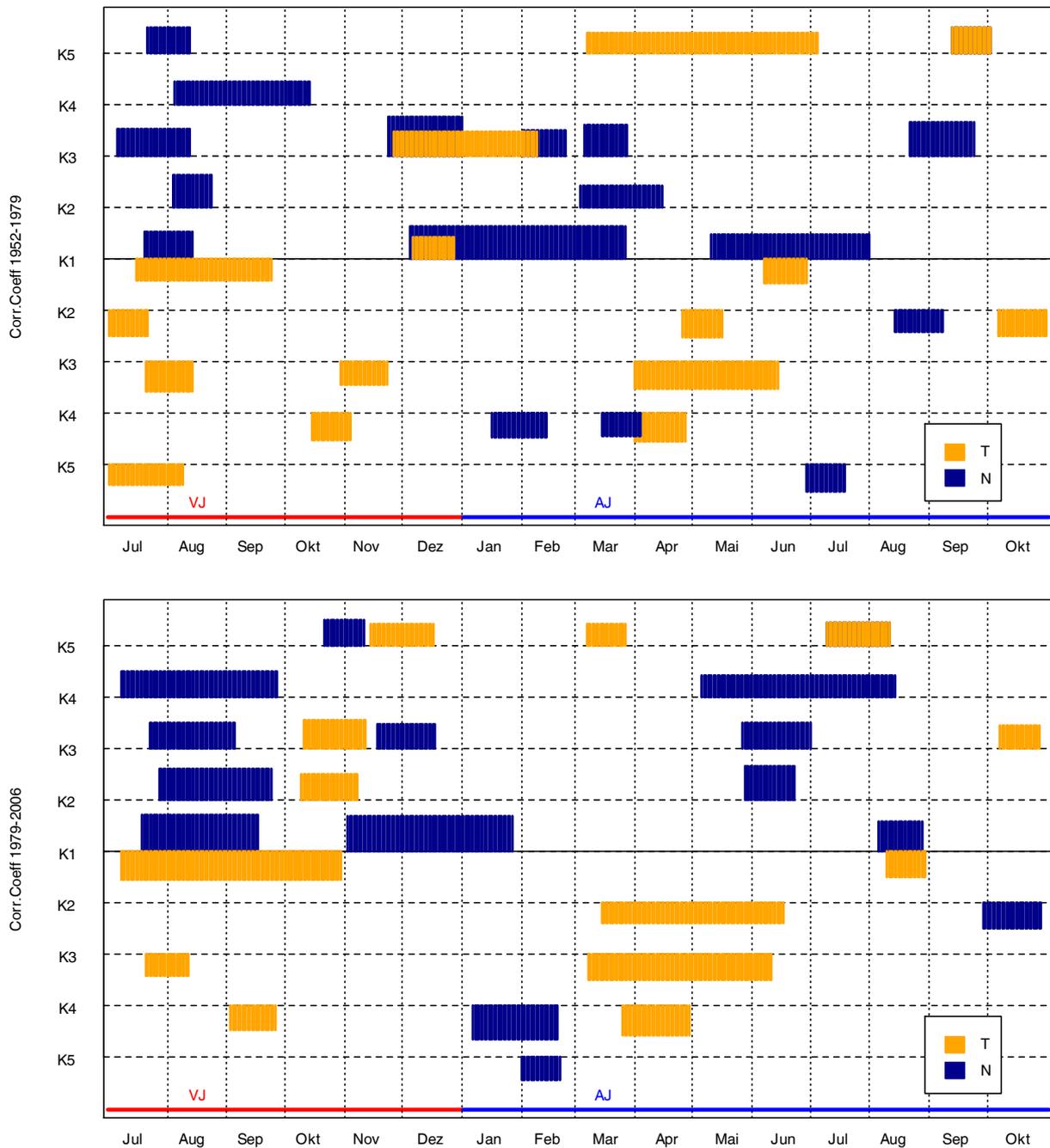


Abb. 8-109: Signifikant mit der Jahrringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres (VJ) bis 31.10. des aktuellen Jahres (AJ) von Temperatur (T) und Niederschlag (N) mit Angabe der entsprechenden Korrelationskoeffizienten (Corr.Coeff) nach Berechnung durch CLIMTREG für die Kernflächen, herrschender Bestand. Die Höhe der farbigen Flächen über den waagerechten Bezugslinien (Abstand = 1) entspricht den Korrelationskoeffizienten. Getrennte Modellierung für die Perioden 1951-1979 (oben) und 1979-2006 (unten).

8.15 Signifikant mit dem Jahrringindex korrelierte Witterungsperioden für die Zusatzflächen: Vergleich von Beginn und Ende des Untersuchungszeitraums

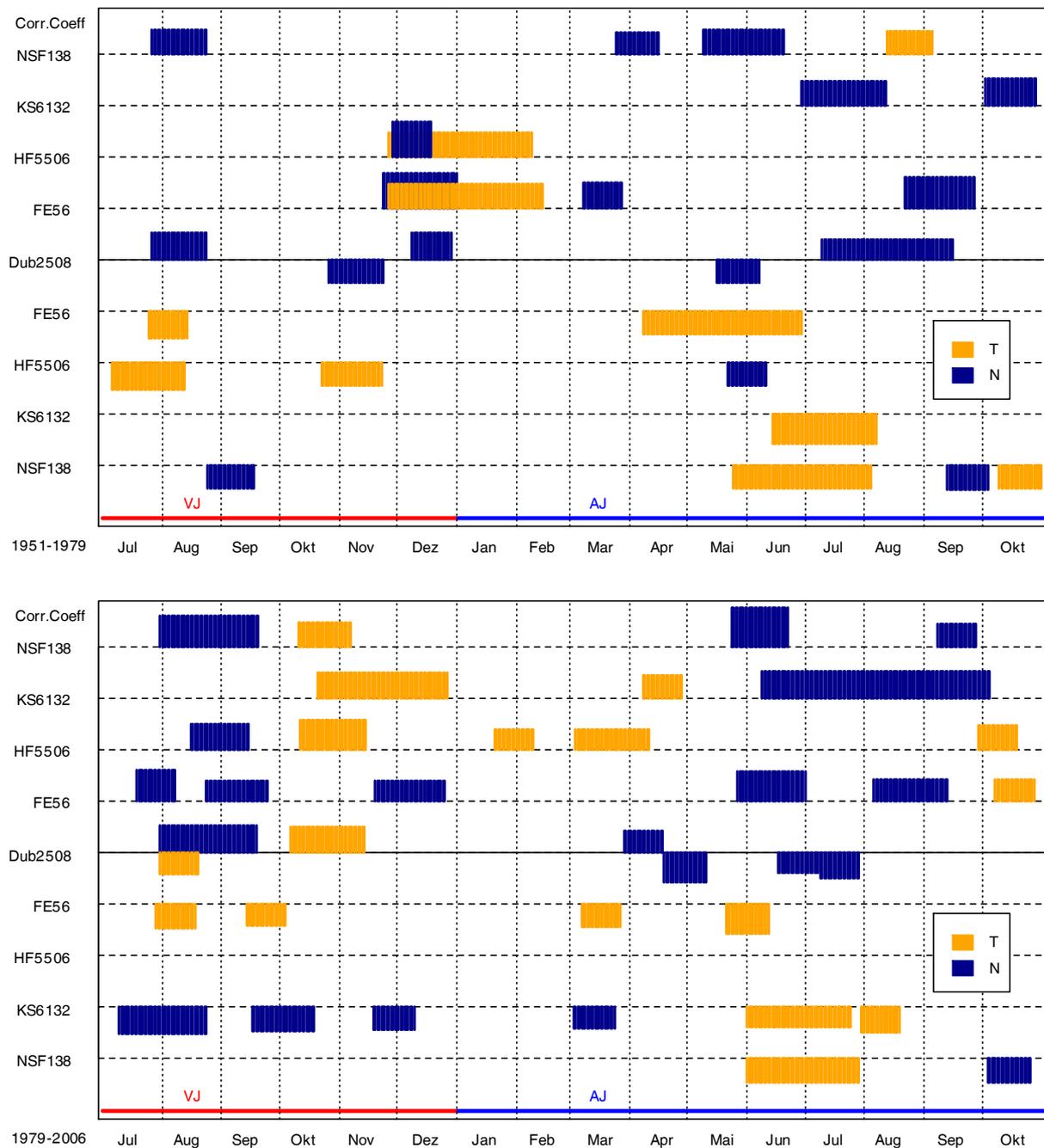


Abb. 8-110: Signifikant mit der Jahrringindex-Zeitreihe korrelierte Zeiträume in der Periode 01.07. des Vorjahres (VJ) bis 31.10. des aktuellen Jahres (AJ) von Temperatur (T) und Niederschlag (N) mit Angabe der entsprechenden Korrelationskoeffizienten (Corr.Coeff) nach Berechnung durch CLIMTREG für die Zusatzflächen. Die Höhe der farbigen Flächen über den waagerechten Bezugslinien (Abstand = 1) entspricht den Korrelationskoeffizienten. Getrennte Modellierung für die Perioden 1951-1979 (oben) und 1979-2006 (unten).

8.16 Vergleich der Jahrringindex-Abweichung im Szenariozeitraum 2001-2055 für Modell-Zeitreihen des Jahrringindex aus CLIMTREG bei unterschiedlicher Kalibrierung

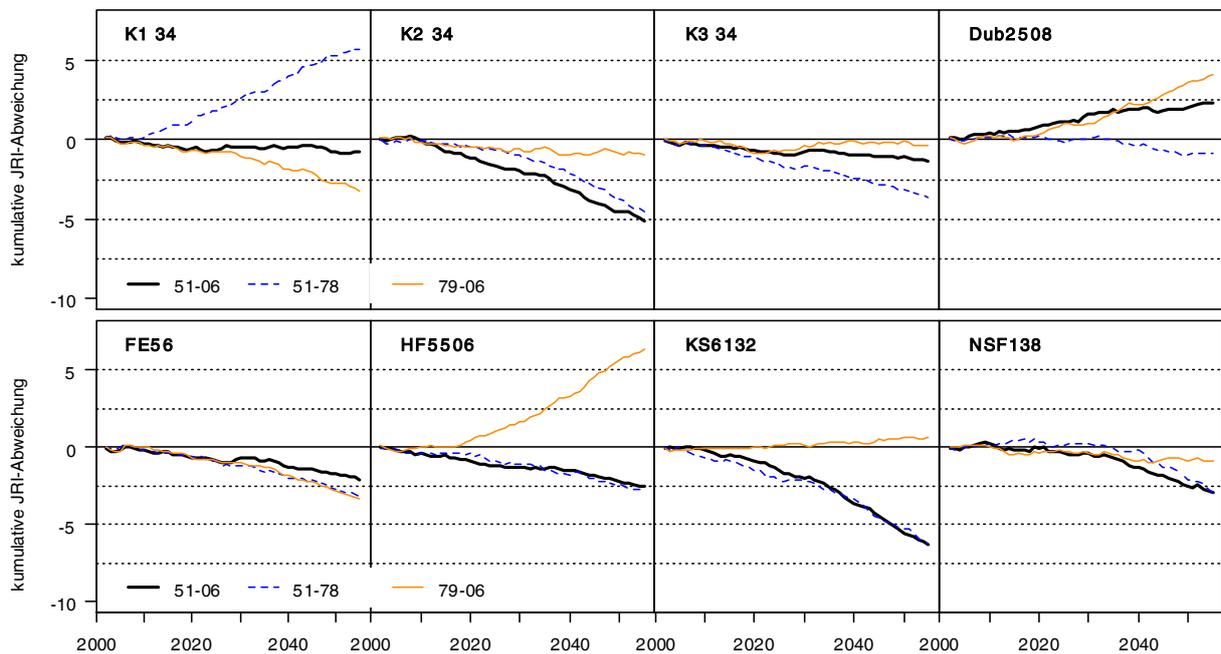


Abb. 8-111: Kumulative Abweichungen der in CLIMTREG auf Basis verschiedener Kalibrierungszeiträume modellierten Jahrringindex-Zeitreihen vom Referenzwert 1 im Szenariozeitraum 2002-2055 für den beherrschten Bestand (Sozialklasse 3+4) der deutschen Kernflächen sowie für die ausgewählten Zusatzflächen. Als Kalibrierungsperioden wurden das gesamte gemeinsame Intervall (CIN) benutzt (51-06) sowie die erste (51-78) und die zweite (79-06) Hälfte des CIN.

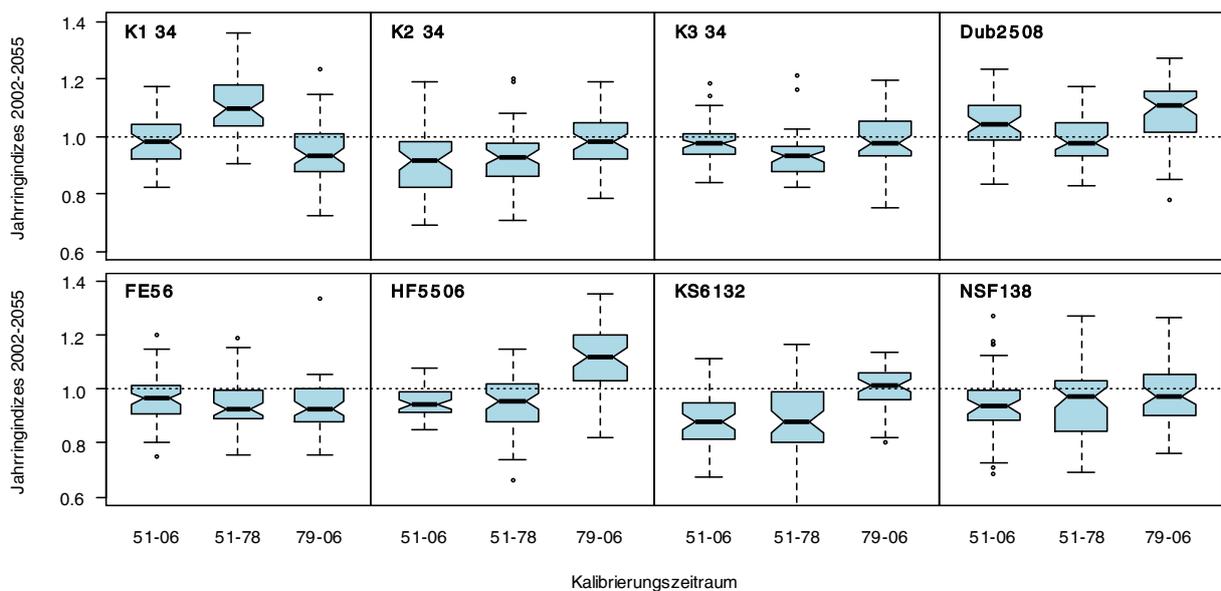


Abb. 8-112: Verteilung der Jahrringindizes in den Modell-Zeitreihen nach CLIMTREG für die Kalibrierungszeiträume 1951-2006, 1951-1978 und 1979-2006 für den beherrschten Bestand (34) der deutschen Kernflächen und die ausgewählten Zusatzflächen.