

Anpassungsbedarf für den Stadtbaumbestand – Dendrochronologische und ökophysiologische Ergebnisse

Produkt 3.1.2 d

Version: 2.0
Status: Final
Datum: 14.11.2011

TP 3.1.2 – Grün- und Freiflächen, städtebauliche Strukturen, biometeorologische Effekte –

TP-Leiter: Prof. Wolfgang Wende

Bearbeiter: Sten Gillner
Prof. Dr. Andreas Roloff
Institut für Forstbotanik und Forstzoologie,
Technische Universität Dresden

Kontakt: Tel.: 035203/38-31354
Fax: 035203-3831272
E-Mail: gillner@forst.tu-dresden.de;

REGKLAM

Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordinator: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Inhalt

1	Einleitung.....	4
2	Ziele	5
3	Material und Methoden.....	6
3.1	Standorte und Arten.....	6
3.2	Dendrochronologische Datengrundlage und Datenerfassung.....	10
3.2.1	Auswahl der Probebäume und Datenerhebung.....	10
3.2.2	Dendrochronologische Probenentnahme und Präparation.....	11
3.2.3	Vordatierung und Vermessung	13
3.2.4	Methodik der Datierung und Synchronisation.....	13
3.3	Klimadaten und Bodenwasserhaushalt.....	15
3.3.1	Klimadaten für die Analysen der klimatischen Wachstumsabhängigkeit	15
3.3.2	Witterung in den Jahren 2009 und 2010.....	16
3.3.3	Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und ALVPD für die physiologischen Messungen	17
3.3.4	Bodenwasserhaushalt der Straßenbaumstandorte für die physiologischen Messungen	18
3.4	Wachstumsbeschreibung	19
3.5	Klima-Zuwachs-Analysen.....	20
3.5.1	Trendeliminierung	20
3.5.2	Signalstärke und Qualität der Chronologie	21
3.5.3	Klima-Zuwachs-Analysen.....	21
3.5.4	Einzeljahr-Analysen	22
3.6	Blatt-Wasserpotentialmessungen mit der Druckkammermethode nach Scholander	24
3.7	Gaswechsellanalytik	25
3.7.1	Transpiration und CO ₂ -Gaswechsel	25
3.7.2	Wassernutzungskoeffizient (WUE).....	27
3.8	Statistische Auswertung der Gaswechsellanalytik und des Wasserhaushaltes	27
4	Ergebnisse.....	29
4.1	Datierung und Synchronisation.....	29
4.2	Wachstumsbeschreibung	31
4.2.1	Beziehungen der Standortchronologien untereinander	36
4.2.2	Standort und Zuwachs.....	39
4.3	Klima und Zuwachs.....	41
4.3.1	Veränderung der Klima-Zuwachs-Relation.....	60

4.3.2	Einzeljehranalysen.....	69
4.4	Bodenwasserhaushalt	84
4.5	Blatt-Wasserpotential	87
4.6	Gaswechsellanalytik	88
4.6.1	Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit.....	88
4.6.2	Photosynthese und WUE.....	91
4.6.3	Abhängigkeiten des Gaswechsels vom Bodenwasserhaushalt und dem ALVPD	96
5	Diskussion.....	105
5.1	Methodenkritik und Datengrundlagen	105
5.2	Kurzdiskussion der dendrochronologischen Ergebnisse	109
5.3	Blatt-Wasserpotential	114
5.4	Gaswechsel.....	114
6	Schlussfolgerungen und Empfehlung für die zukünftige Verwendung im urbanen Raum	118
7	Literatur.....	121
8	Anhang.....	127

1 Einleitung

Die positiven Wirkungen des Stadtgrüns auf die menschliche Gesundheit werden in vielen Studien belegt (LAFORTEZZA et al., 2009, NOWAK et al., 2006, HARDIN & JENSEN, 2007, MCPHERSON & SIMPSON, 2002). Allerdings wurde das städtische Grün dabei in der Regel in seiner Gesamtwirkung betrachtet und nur selten zwischen den einzelnen Baumarten unterschieden. So sorgen insbesondere Stadtbäume durch ihre Beschattung für eine Minderung der städtischen Überwärmung und durch ihre Transpiration für eine Verbesserung der Luftqualität. Diesen Wohlfahrtswirkungen der Stadtbäume stehen in den letzten Jahrzehnten sichtbare Vitalitätsminderungen der Gehölze durch Klimaextreme und hier insbesondere sommerlichen Hitze- und Dürreperioden gegenüber. Dabei wird eine ausreichend hohe Toleranz gegenüber Trockenstress bei einer mittel- und langfristig anhaltend hohen Vitalität für die Beibehaltung einer gesunden grünen Infrastruktur in urbanen Räumen künftig von noch größerer Bedeutung sein als heute. Die Bestrebungen zu einer Erhöhung des Baumbestandes in Dresden auf bis zu 77.000 Straßenbäume im Stadtgebiet unterstreichen zusätzlich die Dringlichkeit einer nach ökologischen, ökonomischen und zukunftstauglichen Gesichtspunkten ausgerichtete Baumartenwahl.

Im Teilprojekt 3.1.2. d „Anpassungsbedarf für den Stadtbaumbestand“ des Forschungsverbundprojektes REGKLAM (Entwicklung und Erprobung eines umsetzungsorientierten Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden) soll ein Beitrag zur Bewertung der zukünftigen Eignung von zehn häufig vorkommenden Straßenbaumarten geleistet werden. Dabei gilt es a.) durch die Analysen dendroklimatologischer Wachstumsmuster von Straßenbäumen, Aussagen über deren Vitalität sowie Risikoprognosen für das langfristige Überleben, und b.) durch die Erfassung des Wasserhaushaltes und des Stoffaustausches das artspezifischen Leistungsvermögens unter Trockenstress zu erfassen. Die im Folgenden vorgestellten dendrochronologischen und physiologischen Untersuchungen sollen damit helfen, das aktuelle und zukünftige Gefährdungspotenzials der hier betrachteten elf Baumarten aufzeigen und dazu beitragen besonders „wassereffiziente Arten“ zu identifizieren.

2 Ziele

Da der Raum Dresden zu den Ausläufern eines relativen Trockengebietes mit rund 600 mm Jahresniederschlag zählt und gleichzeitig große Unterschiede der Niederschlags-, Temperatur- und Bodenverhältnisse auf engem Raum bestehen (LANDESHAUPTSTADT DRESDEN, 1993), eignet sich das Dresdner Stadtgebiet für eine übertragbare Gefährdungsanalyse auf andere Städte. Auch die sich häufenden sommerlichen Trockenperioden, die von kurzen, heftigen Starkniederschlägen unterbrochen werden, bei insgesamt rückgängigen Sommerniederschlägen und zunehmenden Temperaturen (BERNHOFER, 2007), bestätigen nicht nur die Eignung des Dresdner Baumbestandes, sondern belegen auch die Notwendigkeit einer Untersuchung.

In Anbetracht der erwähnten Problematik stellen sich folgende Fragen:

- Welche Unterschiede im Reaktionsmuster lassen sich zwischen den Baumarten feststellen?
- Welchen Einfluss haben das langfristige Klima und das aktuell wirkende Wetter auf das Wachstumsverhalten und den Stoffaustausch der Baumarten?
- Wie wirken sich die unterschiedlichen Standorte bzw. Standortfaktoren (Bodenversiegelung, Stadtstraßenbaum, Baum in städtischer Grünanlage, Bodenwasserhaushalt) auf das Wachstumsverhalten und ökologische Leistungsvermögen aus?
- Lassen sich daraus konkrete Empfehlungen oder Ablehnungen für Neupflanzungen im urbanen Raum in Hinblick auf den sich abzeichnenden Klimawandel und die unterschiedlichen Standorte aussprechen?

Aus diesen Fragen lassen sich folgende Ziele des Forschungsvorhabens ableiten:

- Genaue Klassifikation des Einzelbaumstandortes;
- Berechnung und Analyse der Wachstumsverläufe (Bewertung des Reaktionsverhaltens der Baumarten);
- Berechnung der Klima-Zuwachs-Analysen sowie deren zeitlichen Stabilität;
- Ermittlung Witterungsabhängigkeit des Zuwachses unter dem Aspekt der Trockentoleranz;
- Messungen des Bodenwasserhaushaltes für die Standorte der physiologischen Messungen
- Abschätzung des *aktuellen* und *zukünftigen* Gefährdungspotenzials der zehn Baumarten bei gegebenem Witterungsverlauf am Beispiel des Dresdner Stadtgebietes.

3 Material und Methoden

3.1 Standorte und Arten

Um den Zielen der Arbeit, artspezifische Vergleiche zum Wachstumsverhalten und dem Klima-Zuwachsverhalten sowie den Einfluss von Trockenjahren zu untersuchen, gerecht zu werden, wurden 503 Bäume auf 25 Standorten im Stadtgebiet von Dresden beprobt. Dem dendrochronologischen Part ging die Recherche im Baumkataster der Stadt Dresden und in den Unterlagen der Forsteinrichtung der Forstämter Neustadt sowie Dresden voraus. Damit konnte anhand des Alters, des Standortes und des Gesundheitszustandes eine Vorauswahl potentiell geeigneter Straßen- und Waldbäume für eine Zuwachsbohrung getroffen werden. Nach Absprachen mit dem Amt für Stadtgrün, des Forstamtes Neustadt, des Forstamtes Dresden und der oberen Naturschutzbehörde im Regierungspräsidium Dresden erfolgte für die Bäume der ausgewählten und genehmigten Standorte eine genauere Begutachtung. Eine Übersicht über die detaillierte Lage der Standorte im Stadtgebiet gibt Abbildung 3.1.

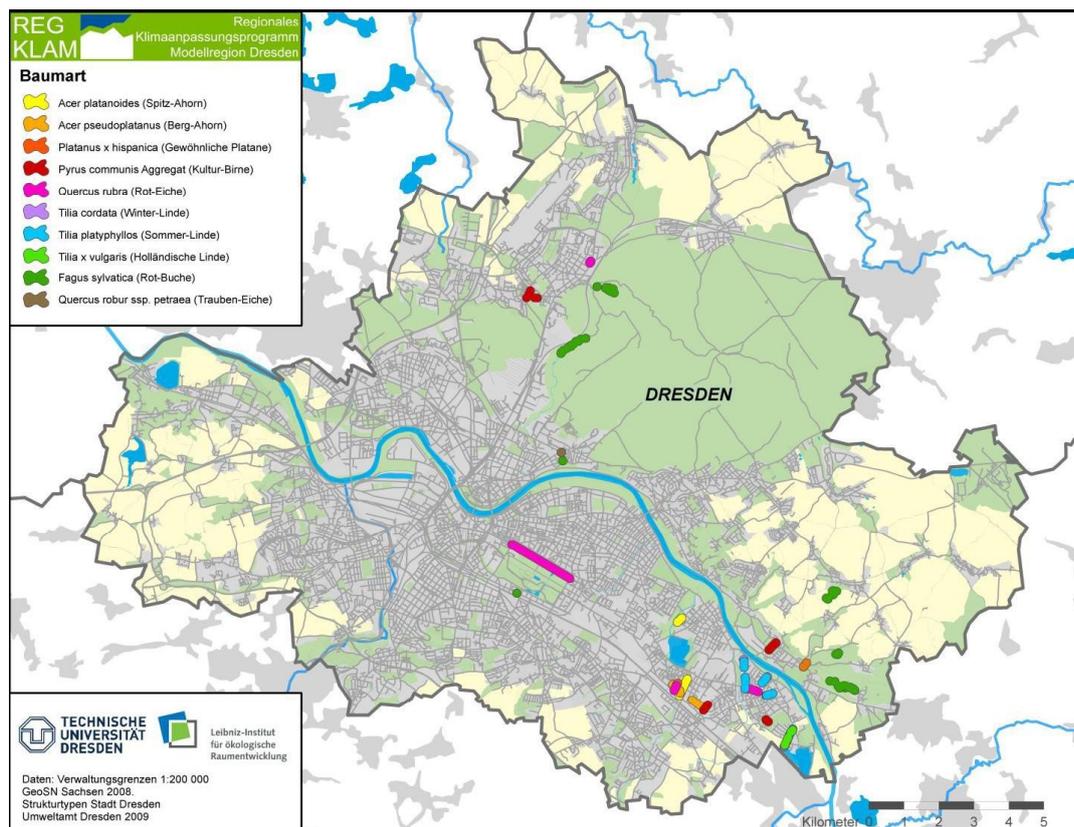


Abbildung 3.1: Übersichtskarte der dendrochronologischen Probestandorte im Stadtgebiet von Dresden

Die Böden der urbanen Straßenbaumstandorte können gemäß der Klassifizierung der World Reference Base of Soil Resources (WRB) in die Gruppe der Technosole eigeordnet werden. Von primärer Bedeutung für die Pedogenese und die daraus resultierenden Bodenentwicklungsreihen ist das Ausgangsgestein, welches die Eigenschaften des Bodens

festlegt. In Tabelle 3.1 sind die Zuordnungen der Standorte zu den Mesoreliefformen des Dresdner Stadtgebietes, die Lithologie und die Mächtigkeit der bindigen Schichten verzeichnet, wodurch eine Einschätzung der Bodencharakteristik möglich wird.

Tabelle 3.1: Neigung, Höhe und Bodencharakteristik der Standorte (LANDESHAUPTSTADT DRESDEN, 1993)

Gebiete Standort (Straße)	Neigung	Höhe [m. ü NN]	Lithologie Hauptdeckungsschichttypen	Bindige Schichten Mächtigkeit [m]
1. Gebiete des Elbtales				
Berchtesgadener Straße	e	113	Altwasserläufe der Elbe, Auenlehm; WL T/U – S, über G und S	0,5 – 3,0 i.M. 2,5
Bernard-Shaw-Straße	e	117	Niederterrasse, Talsand; S, über G und X	Nicht durchgängig ausgebildet
Bosewitzer Straße	e	118	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Försterlingstraße	e	117	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Krippener Straße	e	118	Niederterrasse, Talsand; S, über G und X	Nicht durchgängig ausgebildet
Lilienthalstraße	e	119	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Meußlitzer Straße	e-sch.g	116-119	Niederterrasse, Talsand; S, über G und X	Nicht durchgängig ausgebildet
Nußallee	mg-s.g.	114-126	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Peter-Schmoll-Straße	e-sch.g.	115-119	Niederterrasse, Talsand; S, über G und X	Nicht durchgängig ausgebildet
Robert-Berndt-Straße	e	119	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Sachsenwerkstraße	e	119	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Stübelallee	e-sch.g.	114-117	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Tronitzer Straße	e-sch.g.	113-117	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Wiener Straße	e	119	Niederterrasse, Tallehm; t/s – kL über G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
Zschierener Straße	e	118	Niederterrasse, Tallehm; t/s – G und X	0,5 – 4,0 i.M. 2,5
2. Gebiete der Nebentäler				
Prießnitzwasserfall	mg-s.g	170-180	Altwasserläufe d. Nebentäler, WL T/U – S, über G und X	0,5 – 3,0 i.M. 2,5

3. Gebiete der flachen Hänge

Am Hellerrand	sch.g.	198-199	S (höhere Terrassen)	keine
Kellerbrücke	s	170-190	S (höhere Terrassen)	keine
Waldschlösschenstraße	sch.g- m.g	124-135	S (höhere Terrassen)	keine
Wiener Straße	e	119	Lö/LöL über G und X (Niederterrasse)	2,0 – 5,0 i.M. 3,5

4. Gebiete der Hoch-flächen und Steilhänge

Borsberghänge	s-schr	180-220	FS (Granodiorit) – zersetzt, z.T. t/s bedeckt	Angaben nicht erfüllt
Friedrichsgrund	m.g-s	210-270	FS (Granodiorit) – zersetzt, z.T. t/s bedeckt	Angaben entfallen
Käthe-Kollwitz-Platz	sch.g	197-198	WL S/L über FS	Nicht durchgängig ausgebildet
Meixstraße	m.g	179-182	FS (Granodiorit) – zersetzt, z.T. t/s bedeckt	Angaben entfallen
W.-Shakespeare-Straße	sch.g	211-213	FS (Gneis) – zersetzt, z.T. t/s bedeckt	Angaben entfallen

Abkürzungen

FS	Festgestein		
T	Ton	t	tonig
U	Schluff	u	schluffig
L	Lehm	l	lehmig
S	Sand	s	sandig
G	Kies	g	kiesig
X	Stein	x	steinig
Lö	Löß		

Neigung

e	eben
sch.g	schwach geneigt
m.g	mittel geneigt
s.g	stark geneigt
s	steil
schr	schroff

Die anthropogen bedingte Überprägung der natürlichen Böden, z.B. durch Versiegelung und Verdichtung, führt zu einer Veränderung des Stoffbestandes und des Stoffaustausches zwischen den Böden und der Hydro- bzw. Biosphäre (BLUME, 2000). Besonders der Aspekt der Bodenversiegelung soll darauf hinweisen, dass die mikrostandörtlichen Bodeneigenschaften urbaner Standorte stark von den Angaben in Tabelle 3.1 abweichen können (BLUME, 2000). Dementsprechend wurde eine Klassifikation des Einzelbaumstandortes der Straßenbäume angestrebt, indem zunächst für die Straßen der

Versiegelungsgrad nach BLUME (1993) und die Versiegelungsstufe nach RENGER (1993) erfasst wurden. Anschließend wurden die Flächenanteile der Belagsarten nach BLUME (1993) (z.B. Asphalt, Pflaster, Schotterrasen) in einem Radius von zehn Metern um den Stamm geschätzt. Aus der jeweiligen Porosität der Belagsart und dem Flächenanteil der Oberflächenversiegelung wurden die mittlere Porosität des Einzelbaumes sowie weiterhin die mittlere Porosität der jeweiligen Straße aufgezeichnet. Ein Vergleich der Porosität der Straßenbaumstandorte erfolgte über multiple paarweise Vergleiche der mittleren Ränge nach dem χ^2 -Ansatz nach SACHS & HEDDERICH (2006). In Gleichung 3.1 ist die Berechnung zur statistischen Überprüfung der Abweichung zwischen der Porosität der Straßenbaumstandorte nach dem χ^2 -Ansatz (SACHS & HEDDERICH, 2006) angegeben.

$$|\bar{R}_l - \bar{R}_{l'}| > \sqrt{d \times \chi^2_{k-1;0,95} \times \left[\frac{n(n+1)}{12} \right] \left[\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_{i'}} \right]} \quad (3.1)$$

$d = 1$, treten viele Bindungen auf, dann ist

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=r} (t_i^3 - t_i)}{n^3 - n} \quad (3.2)$$

t_i = Anzahl der jeweils gleichen Rangplätze in der i -ten Bindung. Bedingung $n_i \geq 6$

Die ordinalskalierten Datensätze der Porosität beruhen auf einer Einschätzung der prozentualen Flächenanteile der Belagsarten und der Richtwerte der Durchlässigkeit nach BLUME (1993). Deshalb wurde die Abhängigkeit der Wachstumsparameter mittlere Sensitivität, Autokorrelation (1. Ordnung), durchschnittlicher jährlicher Radialzuwachs zur Porosität mittels Spearmans Rangkorrelationskoeffizient überprüft. Die Signifikanz der Beziehungen wurde nach dem Verfahren von BEST & ROBERTS (1975) mit der Software R ermittelt.

Im Gegensatz zu den standörtlichen Merkmalen der Straßenbaumstandorte behalten diejenigen der Waldstandorte auf lange Sicht ihre Gültigkeit. Umfangreiche Angaben zur

Bestandesgeschichte, des Bodentyps und –feuchte, der Klassifikation und der Baumartenanteile der vier Waldstandorte finden sich im **Anhang ab Seite 85**.

In Tabelle 3.2 sind die Arten und Straßenbaumstandorte sowie die Anzahl der Bäume pro Standort aufgelistet, für die die Gaswechselanalytik durchgeführt wurde. Zusätzlich wurden für die aufgelisteten Standorte zu jedem Messbaum der Bodenwassergehalt und das Bodenmatrixpotential diskontinuierlich ermittelt.

Tabelle 3.2: Arten und Standorte für die Ermittlung des Bodenwasserhaushaltes und der Ökophysiologie

Arten		Anzahl der Bäume	Standort
<i>Acer platanoides</i>	Spitz-Ahorn	5	Lilienthalstraße
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn	5	Sachsenwerkstraße
<i>Platanus x hispanica</i>	Ahornblättrige Platane	6	Robert-Berndt-Straße
<i>Quercus rubra</i>	Rot-Eiche	3	Robert-Berndt-Straße
<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommer-Linde	4	Krippener Straße
<i>Tilia x vulgaris</i>	Holländische Linde	1	Krippener Straße

3.2 Dendrochronologische Datengrundlage und Datenerfassung

3.2.1 Auswahl der Probebäume und Datenerhebung

Der Radialzuwachs stellt im Vergleich zu biochemischen oder ökophysiologischen Weisern eine aggregierte und robuste Indikatorgröße für das Systemverhalten von Bäumen dar (PRETZSCH, 1999). Neben klimatischen Einflüssen manifestieren sich im Jahrringmuster sämtliche Störeffekte wie zum Beispiel inter- und intraspezifischen Konkurrenzeffekte (SCHWEINGRUBER, 1983), aber auch Alterseffekte, die der Einzelbaum im Laufe seines Lebens erfährt. Der Focus dieser Arbeit liegt auf der Erfassung des klimatischen Wuchspotentials und damit kann das ökologische Wuchs- und Konkurrenzverhalten für die Untersuchung der Straßenbäume vernachlässigt werden. Um Jahrringzeitreihen mit einem maximalen Klimasignal zu gewinnen, orientiert sich die Auswahl der Probebäume auf dem Waldstandort an ihrer sozialen Klasse nach KRAFT (1884, zitiert nach KRAMER & AKÇA, 2002) was zur Verringerung sichtbarer Konkurrenzeffekte im Jahrringbild führt (FRICKER et al., 2006). Gehörten die Bäume der KRAFT'schen Klasse 1 (vorherrschende Individuen) und 2 (herrschende Individuen) an, kamen sie in die engere Auswahl für eine Bohrkernentnahme, denn in diesen Klassen kann davon ausgegangen werden, dass nur geringe Änderungen im Zuwachsgeschehen (Zuwachsdepressionen und -erholungen) infolge von Konkurrenzeffekten im Jahrringbild erkennbar sind. Weiterhin wurden die Bäume in Steilhanglagen so ausgesucht, dass sich ihr Standort in südlicher bis südwestlicher Exposition befand. Um eine interpretierbare Standortschronologie zu erstellen, ist nach SCHWEINGRUBER (1983) eine Mindestanzahl von 10 bis 15 Probebäumen erforderlich. FRANK et al. (2009) verweisen sogar

auf ein Minimum von 20 Bäumen pro Art, um ein stabiles Signal der Population und verlässliche Aussagen der Zuwachsanalysen zu erhalten. Für die urbanen Standorte konnte diese Vorgabe nicht immer erfüllt werden, da teilweise pro Art und Straße weniger als 10 Bäume zur Verfügung standen. Im Wald wurden pro Art mindestens 15 Bäume anhand von jeweils mindestens zwei Bohrkernen analysiert. Neben dem Kriterium des Stichprobenumfangs war die Vorauswahl der Straßenbäume nach einer visuellen Begutachtung ein wesentliches Auswahlkriterium. Eine Probenentnahme wurde nur an Individuen durchgeführt, die keine oder nur wenig sichtbare Schnittmaßnahmen im Kronenbereich aufwiesen, keine sichtbaren Befallssymptome durch Pathogene zeigten sowie keine grundsätzlich abweichende Standortcharakteristik im Vergleich zum Gesamtkollektiv aufwiesen. Bei zerstreutporigen Hölzern und Straßenbäumen mit weniger als 10 Individuen je Standort wurde die Bohrprobenzahl pro Baum auf mindestens drei erhöht, um sichere Baumittekurven zu konstruieren und so eventuell auftretende Jahringausfälle oder undeutliche Jahringgrenzen besser zu erkennen.

3.2.2 Dendrochronologische Probenentnahme und Präparation

Die Bäume wurden in 1,3 m Höhe mit einem Zuwachsbohrer mindestens zweimal, radial von der Rinde zum Mark, angebohrt (GRISSINO-MAYER, 2001; FRITTS, 1976, STOKES & SMILEY, 1996). Bei einigen Straßenbäumen konnten im Zuge der Fällung Stammscheiben in 1,3 m Höhe entnommen werden, was den Arbeitsschritt der Synchronisation durch den Blick auf den gesamten Stammquerschnitt deutlich erleichterte. Einen Überblick über die Standorte, Arten und die Anzahl des Probenmaterials gibt Tabelle 3.3.

Für ein bestmögliches Erkennen der Jahringgrenzen war es erforderlich, die Bohrproben mit Hilfe eines Stereomikroskops so zu fixieren und aufzukleben, dass die Zellen im Querschnitt optimal sichtbar wurden (BONN, 1998). Dies stellte zudem sicher, dass beim späteren Arbeitsschritt des horizontalen Einmessens die wirkliche Breite des Jahrrings ermittelt wird. Besonders bei Bäumen mit extremen Standortbedingungen, wie Straßenbäumen des urbanen Raumes oder Bäumen am Rande ihrer physiologischen Verbreitungsgrenze z.B. in den Hochlagen der Alpen (NEUWIRTH, 2004), können die Jahringgrenzen sehr eng beieinander liegen und das jährliche Dickenwachstum sehr gering ausfallen. Zusätzlich erschweren in diesen Fällen häufige Dichteschwankungen, auskeilende oder ausfallende Jahrringe (SCHWEINGRUBER, 2001) eine Auswertung. Diese Aspekte erforderten eine sehr präzise Präparation der Späne, um Fehldatierungen zu vermeiden.

Tabelle 3.3: Übersicht der Baumarten, Standorte (W = Waldbaum, S = Straßenbaum, E = städtischer Einzelbaum), Proben (B = Bohrproben, S = Stammscheibe), Anzahl der Probebäume je Standort

Baumart		Standort	Bezeichnung, () Abkürzung	Prob.	Anzahl
<i>Acer platanoides</i>	Spitz-Ahorn	S	Berchtesgadener Straße (BER)	B	13
<i>Acer platanoides</i>	Spitz-Ahorn	S	Lilienthalstraße (LIL)	B	36
<i>Acer platanoides</i>	Spitz-Ahorn	S	Sachsenwerkstraße (SAC)	B	6
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Berg-Ahorn	S	Sachsenwerkstraße (SAC)	B	27
<i>Fagus sylvatica</i>	Rot-Buche	W	Borsberghänge (BOR)	B	19
<i>Fagus sylvatica</i>	Rot-Buche	E	Bosewitzer Straße (BOS)	S	1
<i>Fagus sylvatica</i>	Rot-Buche	W	Friedrichsgrund (FRI)	B	16
<i>Fagus sylvatica</i>	Rot-Buche	W	Kellerbrücke (KEL)	B	16
<i>Fagus sylvatica</i>	Rot-Buche	W	Prießnitzwasserfall (PRI)	B	16
<i>Fagus sylvatica</i>	Rot-Buche	E	Waldschlösschenstraße (WSC)	S	1
<i>Fagus sylvatica</i>	Rot-Buche	E	Wiener Straße (WIE)	S	2
<i>Platanus x hispanica</i>	Ahornblättrige Platane	S	Meixstraße (MEI)	B	6
<i>Platanus x hispanica</i>	Ahornblättrige Platane	S	Robert-Berndt-Straße (ROB)	B	14
<i>Pyrus communis</i>	Kultur-Birne	S	Am Hellerrand (AM)	B	8
<i>Pyrus communis</i>	Kultur-Birne	S	Bernard-Shaw-Straße (BSH)	B	10
<i>Pyrus communis</i>	Kultur-Birne	S	Försterlingstraße (FOE)	B	12
<i>Pyrus communis</i>	Kultur-Birne	S	Nußallee (NUS)	B	57
<i>Pyrus communis</i>	Kultur-Birne	S	W.-Shakespeare-Straße (WIL)	B	8
<i>Quercus robur</i> subsp. <i>sessiliflora</i>	Trauben-Eiche	W	Borsberghänge (BOR)	B	19
<i>Quercus robur</i> subsp. <i>sessiliflora</i>	Trauben-Eiche	S	Waldschlösschenstraße (WSC)	S	12
<i>Quercus rubra</i>	Rot-Eiche	W	Borsberghänge (BOR)	B	19
<i>Quercus rubra</i>	Rot-Eiche	S	Käthe-Kollwitz-Platz (KKP)	B	14
<i>Quercus rubra</i>	Rot-Eiche	S	Robert-Berndt-Straße (ROB)	B	10
<i>Quercus rubra</i>	Rot-Eiche	S	Stübelallee (STU)	S	60
<i>Quercus rubra</i>	Rot-Eiche	S	Zschierener Straße (ZSC)	B	10
<i>Tilia cordata</i>	Winter-Linde	W	Borsberghänge (BOR)	B	18
<i>Tilia cordata</i>	Winter-Linde	S	Tronitzer Straße (TRO)	B	10
<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommer-Linde	S	Krippener Straße (KRI)	B	14
<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommer-Linde	S	Meußlitzer Straße (MEU)	B	12
<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommer-Linde	S	Peter-Schmoll-Straße (PSC)	B	13
<i>Tilia platyphyllos</i>	Sommer-Linde	S	Tronitzer Straße (TRO)	B	12
<i>Tilia x vulgaris</i>	Holländische Linde	S	Tronitzer Straße (TRO)	B	12

Anschließend wurden die Proben mit einer Bandschleifmaschine bis zur Hälfte des Querschnittes abgeschliffen. Dazu wurde Schleifpapier mit Körnungen von 180 bis zum Feinschliff von 400 genutzt. Bei einigen zerstreutporigen Gehölzen wie Linde, Birne oder

Ahorn führte das Schleifen zu keinen befriedigenden Ergebnissen, so dass die Bohrproben mit einem Skalpell schräg angeschnitten und zum besseren Sichtbarmachen der Jahrringgrenzen teilweise mit Kontrastmitteln (Methylrot, Kreide, Tinte) behandelt wurden.

3.2.3 Vordatierung und Vermessung

Eine Hilfe zum vorläufigen Festlegen der Lage der einzelnen Jahrringe bietet eine Vordatierung. Dafür wurden die Proben unter dem Stereomikroskop mittels einfachen Auszählens der Jahrringe einer vorläufigen Zuordnung unterzogen.

Für die Vermessung der Jahrringbreiten wurde die Messanlage LINTAB (Rinntech, Heidelberg) genutzt. Das System arbeitet mit einer Auflösung von 1/100 mm. Die Messung erfolgte von der Rinde in Richtung des Marks, also von der Waldkante (Endjahr) bis zum letzten vordatierten Jahr im Zentrum der Probe.

3.2.4 Methodik der Datierung und Synchronisation

Die vermessenen Jahrringzeitreihen wurden nun auf ihre exakte Synchronlage kontrolliert und anschließend art- und standortspezifisch zu Masterchronologien zusammengefasst. Dafür wurde die Methodik des „crossdating“ mit den Programmen TSAP (Rinntech, Heidelberg, SANDER, 2004) und COFECHA (COOK, 1985, COOK et al., 1990, GRISSINO-MAYER et al., 1996, GRISSINO-MAYER, 2001) angewendet, wodurch Messfehler erkannt und durch eine erneute Messung beseitigt werden können. Durch eine Überlagerung der temporal und regional typischen Jahrringfolgen wird ein Vergleich zwischen diesen ermöglicht, der zur Identifizierung vorhandener Messfehler führt.

Für die Beurteilung der Synchronität von Jahrringkurven stehen zum einen statistische Kenngrößen und zum anderen der optische Vergleich zur Verfügung (FRITTS, 1976). Zuerst wurden dabei die Radian ($n > 2$) eines Baumes in optischer Form dargestellt. Durch diesen visuellen Vergleich der Zuwachsreihen wurde eine optische Datierung ermöglicht. Falls einzelne Segmente nicht synchron zueinander verliefen, konnte durch eine Verschiebung der Zeitreihen zueinander die Fehlstelle identifiziert werden.

Als nächstes erfolgt die Überprüfung durch statistisch-rechnerische Mittel. Mit Hilfe der in Prozent ausgedrückten Gleichläufigkeit lässt sich aufklären, wie oft die Zuwachsrichtung (steigend, fallend, gleich bleibend) im Überlappungszeitraum die gleiche Tendenz (vgl. Gleichung 3.3) aufweist. Nach ECKSTEIN & BAUCH (1969) ist die statistische Sicherheit maßgeblich von der Anzahl der zu vergleichenden Wertpaare, die mit der Überlappungslänge korreliert, abhängig. Das Signifikanzniveau lässt sich mit Hilfe der Software TSAP anzeigen.

Es sei $\Delta_i = (x_i + 1 - x_i)$, wenn:

$$\Delta_i > 0: G_{ix} = 1$$

$$\Delta_i = 0: G_{ix} = 0$$

$$\Delta_i < 0: G_{ix} = -1$$

Für zwei Kurven

$$G(x, y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} |G_{ix} + G_{iy}| \quad (3.3)$$

Ein weiterer Anhaltspunkt für die Ermittlung des Grads der Abhängigkeit zweier Jahrringzeitreihen ist der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson (STEIGER, 1980) (Gleichung 3.4). Anhand dessen wird die Stärke der Zuwachsänderung sichtbar und die zu vergleichenden Wertepaaren auf ihren linearen Zusammenhang (Wert von -1 bis +1) überprüft.

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (3.4)$$

Die t-Werte nach BAILLIE & PILCHER (1973) (Gleichung 3.5) und HOLLSTEIN (1980) stellen weitere Mittel zur Prüfung der korrekten Synchronlage der Kurven dar. Unter Berücksichtigung der zu vergleichenden Wertpaare wird überprüft, ob die Mittelwerte zweier Jahrringzeitreihen den Erwartungswerten der Grundgesamtheit entsprechen. Langfristige Trends wurden vor der Berechnung des t-Wertes und des Korrelationskoeffizienten durch TSAP entfernt. Für die Berechnung des t-Wertes nach HOLLSTEIN (1980) wurde anstatt eines gleitenden Mittels die in Gleichung 3.6 dargestellte Berechnung zur Indexierung verwendet.

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (3.5)$$

n = Überlappungslänge

r = Korrelationskoeffizient

$$w_i = \log \frac{x_i}{x_i + 1}$$

w_i = Wuchswert im Jahr i

x_i = Zuwachs im Jahr i

Eine abschließende Prüfung der Synchronlage erfolgte mit dem Programm COFECHA (COOK, 1985), indem zunächst die Varianz mit Hilfe eines 32-jährigen Filters um 50 % verringert wurde. Nach der sich anschließenden internen Indexierung und autoregressiven Modellierung der Jahrringkurven wurden die trendbereinigten Zeitreihen gegeneinander korreliert. Die Korrelationswerte geben nun den Grad der Übereinstimmung zwischen den Zeitreihen an. Ein großer Vorteil dieses Programmes liegt darin, dass Abweichungen der zu vergleichenden Kurven sowie Möglichkeiten zu ihrer Korrektur vorgeschlagen werden (COOK, 1985). Nachdem die Fehlstellen lokalisiert und durch eine Nachmessung beseitigt wurden, konnten die Baummittelkurven der Jahrringserien zu Standortschronologien gemittelt werden. Jahrringzeitreihen, die durch ein stark individuelles Wachstum oder durch ausgeprägte Wachstumsschwankungen gekennzeichnet waren sowie Kurven mit nicht identifizierbaren Jahrringgrenzen wurden nicht in die Chronologiebildung einbezogen.

3.3 Klimadaten und Bodenwasserhaushalt

3.3.1 Klimadaten für die Analysen der klimatischen Wachstumsabhängigkeit

Um die Beziehung zwischen dem Radialzuwachs und dem Klima zu ermitteln, wurden die Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und der selbstkalibrierende 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) verwendet. Die langjährigen Zeitreihen der Monatsmittelwerte für die Temperatur und den Niederschlag reichen bis in das Jahr 1812 zurück und wurden durch die Professur für Meteorologie der TU Dresden bereitgestellt. Im Zeitraum von 1812 bis 1916 wurden die Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag verschiedener Quellen zu einheitlichen Zeitreihen zusammengesetzt. Eine Übersicht über die Beobachtungsorte vor 1916 liefern BERNHOFER et al. (2009). Der scPDSI integriert die Werte von Temperatur, Niederschlag und regionaler Bodenbeschaffenheit in ein Maß zur Beurteilung der Feuchtigkeitsangebots einer Region (VAN DER SCHRIER et al., 2006; WELLS et al., 2004). Negative Werte unter -4 sind als „extrem trocken“ definiert. Positive Werte über +4 stehen für

extrem feuchte Bedingungen. Die gegitterten Datensätze des Index liegen für Europa im Zeitraum von 1901 bis 2002 vor (VAN DER SCHRIER et al., 2006).

Um mögliche Wirkungszusammenhänge zwischen dem Klima und dem Zuwachs in den Weiserjahren abzuleiten, wurden die Zeitreihen der Temperatur, wobei die Standardabweichung von 1 und ein Mittelwert von 0 definiert wurden (NEUWIRTH et al., 2007). Damit lassen sich Abweichungen der Witterung einzelner Monate in den Weiserjahren besser zum langjährigen Mittel vergleichen und Ursachen für über- bzw. unterdurchschnittliche Zuwächse ableiten. Für Chronologien die bis zum Jahr 1920 zurückreichen, wurde die Berechnung in der gemeinsamen Periode 1920 bis 2007 durchgeführt und für kürzere Chronologien im Zeitraum 1955 bis 2007.

Der Einfluss von Trockenjahren und die sich daran anschließende Erholung wurden zwischen 1920 und 2003 für insgesamt 12 Trockenjahre ermittelt, die zu einer sogenannten 'superposed epoch' (LOUGH & FRITTS, 1987) zusammengefasst wurden (vgl. Kap. 2.5.4). Das Kriterium für die Auswahl der Trockenjahre war der selbstkalibrierende 'Palmer Drought Severity Index (scPDSI). Im Zeitraum vom März bis Juli wurden die Mittelwerte des Index gebildet und die 11 Jahre mit den niedrigsten Indizes (-5,08 bis -2,49) ausgewählt. In aufsteigender Reihenfolge wurden damit die Jahre: 1964, 1973, 1983, 1991, 1954, 1993, 1963, 1984, 1934, 1992, 1998 selektiert. Zusätzlich wurde das überregionale Trockenjahr 2003 (CIAIS et al., 2005; DELLA-MARTA et al., 2007) in die 'superposed epoch' integriert.

3.3.2 Witterung in den Jahren 2009 und 2010

Für die physiologischen Untersuchungen ist in Abbildung 3.2 der Witterungsverlauf in den Jahren 2009 und 2010 auf Basis der Datenreihen des Deutschen Wetterdienstes abgebildet. Dabei wird besonders deutlich, dass sich der Niederschlag des Jahres 2010 mit hohen Regenmengen im August und September mit einem Jahresniederschlag von über 1000 mm stark von dem des Jahres 2009 mit ebenso leicht überdurchschnittlichen 779 mm Niederschlag unterscheidet. Im gesamten August 2010 fiel über 200 mm Niederschlag und damit an annähernd 20 Tagen fast ein Drittel der langjährigen Niederschlagssumme. Die Wetterdaten verweisen damit auf den ersten Blick auf eher ungünstige Messverhältnisse für Trockenstress-Untersuchungen im Jahr 2010. Trotzdem konnten im Sommer des Jahres 2010 eine höhere Anzahl von Messungen der Gaswechsellanalytik durchgeführt werden als im Vorjahr. Eine Erklärung lässt sich in der Verteilung der Niederschläge und den Sonnenscheinstunden bis zum Monat August finden. Während sich der gesamte Juni und Juli im Jahr 2009 durch häufigere Regenereignisse und eher wechselhafte Witterungsbedingungen

mit nur wenigen trockenen Einzeltagen charakterisieren lässt, konnten für das Jahr 2010 eine höhere Anzahl von Sonnenstunden und geringere Niederschlagsmengen mit zwei ausgeprägten Perioden trockener und hochsommerlich heißer Witterung vom 26.06 bis zum 04.07.2010 sowie vom 08.07 bis 14.07.2010 beobachtet werden .

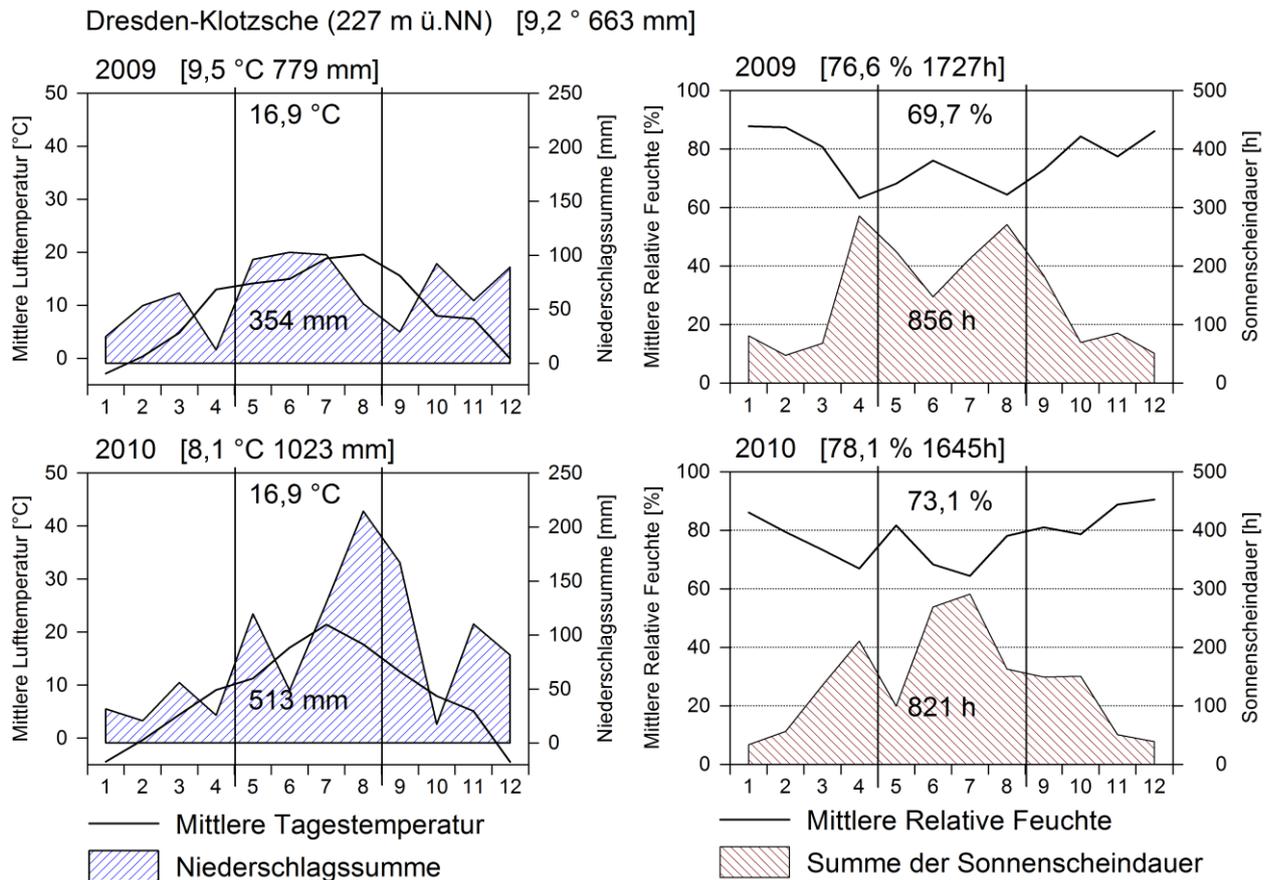


Abbildung 3.2: Klimatische Verhältnisse in den Untersuchungsjahren 2009 und 2010. Die Zeitreihen wurden anhand der Monatswerte der mittleren Lufttemperatur, der Niederschlagssummen, der mittleren relativen Feuchte sowie der Sonnenscheindauer zusammengestellt. Dabei sind Mittelwerte, bzw. Summen für die Untersuchungsperiode von Mai bis August und für das gesamte Jahr [in eckigen Klammern] angegeben. Oberhalb der Diagramme sind die langjährigen Mittelwerte der Lufttemperatur und des Niederschlags für die Periode 1971 bis 2000 aufgeführt. Datenquelle: Deutscher Wetterdienst 2011, Klimastation: Dresden-Klotzsche.

3.3.3 Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und ALVPD für die physiologischen Messungen

Mit dem Photosynthese-Messgerät HCM-1000 (Fa. Walz, Effeltrich) erfolgte zeitgleich zur Ermittlung der ökophysiologischen Parameter eine Aufzeichnung der unmittelbaren Umgebungstemperatur, der Blattemperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit.

Auf Basis der Datensätze der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurde mit Hilfe der MAGNUS-Formel das Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft (VPD, hPa) berechnet (Gleichung 3.7).

$$e^0 = 6,1078 * e^{((17,08085 * Tu)/(234,175 + Tu))} \quad (3.7)$$

Tu Umgebungstemperatur [°C]

e^0 Sättigungsdampfdruck [hPa]

e Wasserdampfdruck der Umgebungsluft [hPa]

Mit Hilfe der relativen Luftfeuchte (RF) wurde aus Gleichung 3.8 der Wasserdampfdruck der Umgebungsluft ermittelt.

$$e = \frac{RF * e^0}{100} \quad (3.8)$$

Schließlich lässt sich aus dem Sättigungsdampfdruck und dem Wasserdampfdruck der Umgebungsluft das VPD (Gleichung 3.9) bilden.

$$VPD = e^0 - e \quad (3.9)$$

Da zwischen der relativen Luftfeuchtigkeit, Druck und Temperatur der Luft und den interzellulären Lufträumen in den Blättern ein enger Zusammenhang besteht, wird in der vorliegenden Arbeit der Einfluss des sogenannte ALVPD [Pa kPa⁻¹] (Air-to-Leaf-Vapor-Pressure-Deficit) auf den Gaswechsel der Baumarten untersucht. Das ALVPD wurde mit Hilfe des HCM-1000 intern aus dem Stoffmengenanteil des Wasserdampfes in der Luft in unmittelbarer Nähe der Blattoberfläche, dem des Wasserdampfes innerhalb des Blattes, dem Gesamtdruck und der Blatttemperatur ermittelt.

3.3.4 Bodenwasserhaushalt der Straßenbaumstandorte für die physiologischen Messungen

Zur Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes wurde der volumetrische Bodenwassergehalt (Θ) und das Bodenmatrixpotential (Ψ_{soil}) genutzt.

Der volumetrische Bodenwassergehalt wurde mit dem Delta-T Bodenfeuchtesensor (Fa. UP GmbH, Cottbus) in den Bodentiefen 20, 30, 40, 60 und 100 cm Tiefe diskontinuierlich ermittelt. Diese Sonde überträgt ein elektromagnetisches Feld in verschiedene Bodentiefen. Je nach Stärke dieses Feldes im umgebenden Raum kann über die Dielektrizitätskonstante (ϵ) und bodentypabhängige Umrechnungstabellen der volumetrische Bodenwassergehalt in (Vol.%) bestimmt werden. Das Bodenmatrixpotential wurde durch Einstich-Tensiometer mit Längen von 20, 40, 60 und 80 cm erfasst, die im Mai installiert und mit entgastem, destilliertem Wasser befüllt wurden. Bei der Messung überträgt die entgaste Einstichnadel die

abgegriffenen Werte des Bodenmatrixpotentials direkt auf einem Druckaufnehmer, der ein entsprechendes Signal zum Speichergerät liefert. Die Messungen des Bodenmatrixpotentials erfolgten in (hPa) mit einer Genauigkeit von $\pm 0,5\%$. Für jeden Baum der vier Straßen wurden mindestens zwei Messröhren zur Bestimmung des Bodenwassergehaltes und zwei Tensiometer installiert.

Die Beobachtung des Bodenwasserhaushaltes über die Zeit ermöglicht eine grundsätzliche Einschätzung der standörtlichen Wasserverfügbarkeit und darüber hinaus die Identifikation von Perioden mit trockenen Bodenbedingungen. Zusätzlich lassen sich so eventuell vorhandene Abhängigkeiten des artspezifischen Transpirationsverhaltens und der Blatt-Wasserpotentiale vom Bodenwasserhaushalt prüfen.

3.4 Wachstumsbeschreibung

Für die Charakterisierung der Standortschronologien wurde der durchschnittliche Radialzuwachs, die Standardabweichung und die beiden wichtigsten Indikatoren für eine Wachstumsbeschreibung, die mittlere Sensitivität und die Autokorrelation erster Ordnung genutzt.

Mit Hilfe des in Gleichung 3.10 angegebenen Rechenwegs kann die Herleitung der Werte der mittleren Sensitivität nachvollzogen werden. Zur Abschätzung der standortspezifischen Wirkung der Umwelteinflüsse auf die Baumarten wird aus den Jahressensitivitäten der Standortchronologie, die mittlere Sensitivität berechnet, die zuverlässige Aussagen für die Art über den gesamten betrachteten Zeitraum ermöglicht.

$$s_z = \frac{1}{s-1} \sum_{t=1}^{s-1} \left| \frac{2(Z_{t+1} - Z_t)}{Z_{t+1} + Z_t} \right| \quad (3.10)$$

$$t = 1, \dots, s$$

Z_t = Wert der Zeitreihe zum Zeitpunkt t

Da positiv wie auch negativ wirkende Klimaereignisse nicht nur Auswirkungen auf den Zuwachs des aktuellen Jahres, sondern auch auf das Folgejahr haben, muss diese Verzögerung erfasst werden. Durch die Autokorrelation, die das mittlere lineare Verhältnis

der laufenden Jahrringbreite zur vorherigen Jahrringbreite (NEUMANN, 2001) wiedergibt, lässt sich diese Vorgabe erfüllen und gleichzeitig Aussagen zum Puffer- und Regelungsvermögen der Bäume treffen. In dieser Arbeit wurde die Autokorrelation erster Ordnung berechnet (Gleichung 3.11), indem die jeweilige Zeitreihe phasenverschoben mit sich selbst korreliert wurde.

(3.11)

$$R_1 = \frac{\sum_{t=2}^u (Z_t - 1 - m_z)}{(s - 1)s_z}$$

Z	=	Zeitreihe	m _Z	=	Mittelwert der Zeitreihe
t	=	Index der Zeitreihe t = 1..s	S _Z	=	Standardabweichung der Zeitreihe

3.5 Klima-Zuwachs-Analysen

3.5.1 Trendeliminierung

Um langwellige Zuwachsschwankungen zu eliminieren muss im Schritt der Indexierung bzw. Standardisierung eine Trendbereinigung durchgeführt werden (COOK & PETERS, 1997). Die Trendeliminierung der Zuwachszeitreihen bewirkt, dass die gemeinsame Varianz betont wird und niedrig-frequentierte Anteile eliminiert werden. Die Varianz der indexierten Zeitreihen kann nun klimatisch interpretiert werden.

Die Standardisierung wurde im Programm ARSTAN (COOK, 1985) vorgenommen und erfolgte durch ein „double detrending“ in einen zweistufigem Verfahren nach COOK et al. (1990). Im ersten Schritt wurden verschiedene deterministische Funktionen an die Zuwachskurve angepasst. Dieser Schritt beinhaltet die Trendeliminierung durch die Anpassung einer negativen Exponentialfunktion, einer einfachen linearen Regressionsgeraden oder einer Hegershoff Funktion. Im zweiten Schritt wurde eine stochastische Methode, die sog. „kubische Spline“-Funktion von 60 Jahren an jede Jahrringzeitreihe angepasst. Die Festlegung auf eine Filterlänge von 60 Jahren stellt einen Mittelweg zwischen optimaler Anpassung an die Rohwerte der Zeitreihen und gleichzeitig hohem interdekadischem Informationsgehalt dar. Die Varianzen der Ringbreiten verringern sich mit zunehmendem Alter ebenso wie die Zuwachsleistung der Bäume. Deshalb wurde eine Varianzstabilisierung

mit einer sogenannten „smoothing spline mit 50% cutoff“ im Programm ARSTAN durchgeführt um die Varianzen auszugleichen.

Erst durch diese multiplen Berechnungen liegen die Serien nun zur weiteren klimatischen Interpretation in dimensionslosen Indizes und unabhängig vom jeweiligen Baumalter vor. Die Indizes wurden ebenso wie die Rohwerte standort- und artspezifisch gemittelt und ab einer Belegungsstärke von vier Serien verwendet. Die indexierte Chronologie beinhaltet jedoch noch immer den Vorjahreseinfluss auf den aktuellen Radialzuwachs, die Autokorrelation. Um Fehlinterpretationen durch die Nachwirkung vorangegangener Klimasignale auszuschließen, wurde die Autokorrelation mittels autoregressiver Modellierung (AR) entfernt. Das Ergebnis ist eine sogenannte Residual-Chronologie, die es ermöglicht, die Variabilität des Jugendwachstums mit dem Wachstum im Alter vergleichbar zu machen (FRITTS, 1976).

3.5.2 Signalstärke und Qualität der Chronologie

Neben der Komponente des Signals, die den interpretierbaren Informationsgehalt der Zeitreihen beinhaltet, findet sich in den Zeitreihen eine zweite Komponente, das sogenannte Rauschen. Mittels der Trendeliminierung wird versucht den Anteil der Störgröße des Rauschens zu verringern und die Signalstärke zu optimieren. Für die Beurteilung stehen neben dem Kriterium des „Signal to Noise Ratio“ (SNR), das „Expressed Population Signal“ (EPS) zur Verfügung. In dieser Arbeit wurde das EPS genutzt, mit welchem das Verhältnis von mittlerem Signal der Indexreihen (=Varianz der Signalkomponente) zur Gesamtvarianz der Chronologie ausgedrückt wird (NEUMANN, 2001). Das EPS ist dabei letztendlich eine Funktion, die von der Stichprobenauswahl (MÄKINEN & VANNINEN, 1999), der Anzahl der Stichproben, der Varianz des Ausgangsmaterials und der Art der Standardisierung beeinflusst wird. Es kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen und sollte über dem von WIGLEY et al. (1984) definierten Schwellenwert von 0,85 liegen. Grundsätzlich wurde die Berechnung über eine Zeitspanne von 50 Jahren mit einer Überlappungslänge von 25 Jahren geprüft. Bei kurzen Zeitreihen von nur wenigen Jahrzehnten, wurde das EPS teilweise über kürzeren Zeitspannen bis zu 20 Jahren mit Überlappungslängen von 10 Jahren berechnet.

3.5.3 Klima-Zuwachs-Analysen

Der Zusammenhang zwischen den Klimavariablen Temperatur, Niederschlag und den Jahrringbreitenindex wurde monatsweise über Korrelationsanalysen in der Periode 1920 bis 2007, bzw. für kürzere Chronologien in der Periode 1955 bis 2007 untersucht. Auch der

Einfluss des scPDSI wurde über Korrelationsanalysen in den Zeiträumen 1955 bis 2001 und 1920 bis 2001 getestet. Mit Hilfe des Programms Dendroclim2002 (BIONDI & WAIKUL, 2004) wird ein „bootstrapping“ durchgeführt, indem künstlich ein höherer Stichprobenumfang (1000 Stichproben) generiert wird und wiederholt Stichproben aus demselben Datensatz gezogen werden. Die Relation der Klima-Zuwachs Beziehung wurde von Vorjahres Juli bis zum August des aktuellen Jahres getestet, da in dieser Zeitspanne über 14 Monate ein Einfluss von Temperatur und Niederschlag auf die Jahrringbildung von Wald als auch von Stadtbäumen physiologisch erklärbar ist.

Zusätzlich wurden Regressionsanalysen auf Basis linearer Regressionsmodelle mittels der Klimaparameter Temperatur, Niederschlag und dem scPDSI vom Vorjahres-Juli bis zum August des aktuellen Jahres durchgeführt, um Unterschiede in der baumarten- und standortspezifische Klimasensitivität über den gesamten Zeitraum zu testen. Die wesentlichen wachstumslimitierenden Klimaparameter und den Zeitraum ihrer Wirksamkeit wurden komplementär auf der Grundlage der zuvor erstellten linearen Modelle schrittweise Regressionsanalysen angewendet. Die Berechnungen erfolgten mit dem Statistikprogramm R.

Die Prüfung mittels moving intervals ermöglicht Aussagen zur zeitlichen Stabilität der klimatischen Wirkung auf den Zuwachs. Diese Dynamik wurde mit Zeitfenstern einer Basislänge von 30 Jahren für Chronologien, die bis zum Jahr 1939 zurückreichen und mit einer Basislänge von 60 Jahren für Chronologien, die weiter als bis zum Jahr 1939 zurückreichen, ausgewertet. Diese Intervalle schreiten nun um jeweils ein Jahr voran über die Zeitreihen und lassen Veränderungen der Relationen sichtbar werden. Zur Anwendung kamen hier ‚moving correlation‘, die durch die Software Dendroclim2002 (BIONDI & WAIKUL, 2004) berechnet wurden. Anders als für die Korrelations- und Regressionsanalysen wurden die Berechnungen über die moving intervals über die gesamte Länge der Zeitreihen ab einer Belegungsstärke von vier Kurven durchgeführt.

3.5.4 Einzeljahr-Analysen

Weiserjahre

Mit Weiserjahranalysen kann eine Identifikation der wachstumslimitierenden Faktoren einzelner Jahre erreicht werden, die in Kombination mit der Klima-Zuwachs-Analyse über dem gesamten Zeitraum zu einem besseren Verständnis der klimatischen Steuerung des Zuwachses führt.

Zur rechnerischen Bestimmung wurden im ersten Schritt, ausgehend von den Rohwerten der Standortchronologie, Cropper-Werte gebildet (CROPPER, 1979). Dabei wurden für jede Baummittelkurve die Quotienten aus den Rohwerten der Zeitreihen und ihres ungewichteten gleitenden Mittels über 13 Jahre gebildet. Diese Cropper-Werte wurden nun normalisiert, wobei für die Perioden von 1920 bis 2007, bzw. von 1955 bis 2007 für die kürzeren Chronologien, die Standardabweichung auf 1 und der Mittelwert auf 0 gesetzt wurden (NEUWIRTH et al., 2007). Diese Vorgehensweise bereinigt die Zeitreihen von langfristigen Trends (BRÄKER, 1981) und hebt die interannuellen Zuwachsveränderungen hervor (vgl. Kap. 2.5.1 Trendeliminierung). Gleichzeitig wird die Vergleichbarkeit der einzelnen Arten durch die Fokussierung der Analyse auf den Zeitraum 1920 bis 2007 bzw. 1955 bis 2007 gewährleistet. Ein weiterer Vorteil dieser Berechnungen liegt darin, dass keine Schwellenwerte für die indexierten Kurven festgelegt werden müssen, die eher subjektiv herbeigeleitet werden und art- und standortsabhängig variieren können.

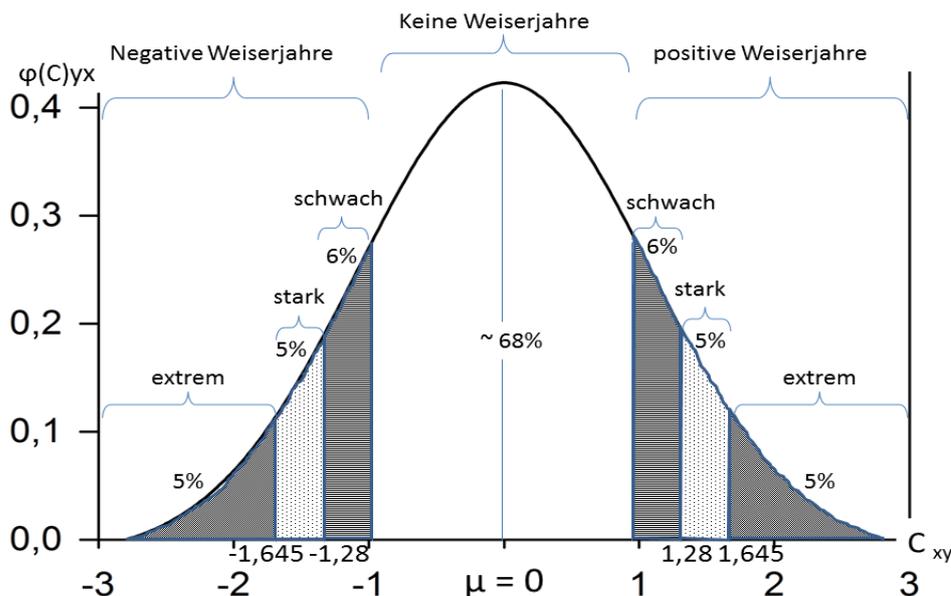


Abbildung 3.3: Dichtefunktionen der Normalverteilungen $\varphi(Z) = 0$ und $\sigma = 1$ für die drei Gruppen von Weiserjahren (schwach, stark, extrem) nach NEUWIRTH et al. (2007)

In Anlehnung an NEUWIRTH et al. (2007) wurden drei Klassen von Weiserjahren definiert: „schwach“ für $|C_{y,z}| > 1$, „stark“ für $|C_{y,z}| > 1,28$, „extrem“ für $|C_{y,z}| > 1,645$ sowie eine Klasse für Jahre mit durchschnittlichem Zuwachs („normal“ für $-1 \leq C_{y,z} \leq 1$). Die Berechnung orientiert sich an die Wahrscheinlichkeitsdichten für die Standardnormalverteilung, so dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines definierten Weiserjahres berücksichtigt wurde (vgl. Abb. 3.3).

Superposed epoch analysis

Um die Auswirkungen von Trockenjahren zu bestimmen, wurde die Methodik der 'superposed epoch analyses' (SEA) angewendet (LOUGH & FRITTS, 1987; ORWIG & ABRAMS, 1997). Diese Methodik ist hilfreich um die Beziehung zwischen klimatischen Extremen (key events), hier Trockenjahr, und der Stärke der Antwort im entsprechenden Jahr (key response), hier Jahrring, zu beschreiben (HAURWITZ & BRIER, 1981). Im Gegensatz zur Weiserjahanalyse wird hier von der Ursache auf die Wirkung geschlossen.

In einem ersten Schritt wurde die Differenz aus dem mittleren Jahrringindex jedes Baumes und dem dazugehörigem Mittelwert für insgesamt 11 Jahre (fünf Jahre vor dem Trockenjahr, das Trockenjahr selbst und für die fünf Jahre danach) gemittelt. Der Signifikanztest wurde mittels eines sog. ‚bootstrappings‘ zur Herleitung von Konfidenzintervallen ($P < 0,05$) (dplR, BUNN, 2008) durchgeführt. Ausgehend von den jeweiligen Chronologien wurden 1000 programmintern erstellte Zeitreihen berechnet und anhand dieser getestet, ob sich der Indexwert im betreffenden Jahr signifikant vom durchschnittlichen Zuwachs unterscheidet. Diese Analyse erfolgte mit der Software R (R, DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

3.6 Blatt-Wasserpotentialmessungen mit der Druckkammermethode nach Scholander

Das Blatt-Wasserpotential Ψ_{\min} wurde mit der Druckkammer-Methode nach Scholander (SCHOLANDER et al. 1965) bestimmt. Die Messungen erfolgten für das Tagesminimum-Blatt-Wasserpotential Ψ_{\min} in den Mittagsstunden von 12:00 bis 13:30 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ) an mindestens vier Blättern pro Baum und mindestens drei Bäumen pro Messung. Dafür wurden intakte Blätter (unverletzt, keine Fraßspuren oder Verfärbungen) des zweiten und dritten Blattaustriebes aus der Lichtkrone genutzt. Die Blätter wurden zunächst abgeschnitten und unmittelbar anschließend so in die Messkammer des Druckgefäßes eingespannt, dass der Blattstiel aus dem Aufsatz herausragte. Durch das Abschneiden des Blattes und den daraus folgenden Rückgang der Transpiration geht man in diesem Zustand von einem Gleichgewicht zwischen den Wasserpotentialen des Apoplast und des Symplast aus (KOIDE et al. 1989), die Wassersäule zieht sich entsprechend im Xylem zurück. Danach wurde durch allmähliches Einleiten von Stickstoff der Druck in der Kammer erhöht, bis das Xylemwasser an der Schnittfläche erschien. Sobald auf dem Querschnitt des Blattstiels Feuchtigkeit sichtbar wird, entspricht der aktuelle positive Kammerdruck dem negativen Druckwert des Blatt-Wasserpotentials und der Messwert konnte abgegriffen werden (VON WILLERT et al. 1995). Für jeden Baum wurden vier Wiederholungen durchgeführt. Die

Messung des Blatt-Wasserpotentials wurde mit der Scholander-Apparatur (PMS 1000, PMS Instruments, Corvallis, OR, USA) durchgeführt.

3.7 Gaswechsellanalytik

3.7.1 Transpiration und CO₂-Gaswechsel

Bei der Gaswechsellanalytik werden die pflanzlichen CO₂-Umsätze und die Transpiration ins Verhältnis gesetzt. Dafür kam das tragbare Photosynthese-Messgerät HCM-1000 (Fa. Walz, Effeltrich) mit einem Lichtaufsatz zum Einsatz. Die Messungen wurden, ebenso wie für die Erfassung des Blatt-Wasserpotentials, an Blättern des zweiten und dritten Blattaustriebes in der Lichtkrone vorgenommen (Abb. 3.4).

Tabelle 3.4



Abbildung 3.4: Messküvette mit Lichtaufsatz des Steady-State-Porometers bei der Messung an Spitz-Ahorn (Sommer 2009) auf der Lilienthalstraße

Die Messungen wurden an Blättern der Lichtkronen durchgeführt, da im Gegensatz zu Sonnenblättern aus den obersten Kronenteilen, an Schattenblättern aus den unteren Kronenteilen teilweise stark streuende Messergebnisse zu erwarten sind (MORECROFT &

ROBERTS 1999). Dabei wurden vier Bäume pro Art und Straße ausgewählt, an denen wiederum vier Blätter mit einer Wiederholung gemessen wurden.

Die Höhe der Umsatzraten von Transpiration und Netto-Photosynthese ist geprägt vom tagesperiodischen Anstieg und Abfall der Temperatur sowie der Verdunstung der umgebenden Atmosphäre. Bei einem hohen Dampfdruckdefizit, wie es häufig an heißen Sommertagen zwischen den Blättern und der Umgebungsluft auftritt, erhöht sich die Transpiration sehr stark (ZACH et al. 2010). Mit dieser Dynamik ist ein Tagesgang sowie eine jahreszeitliche Abhängigkeit der Transpiration und der Photosyntheseleistung gekoppelt (MORECROFT et al. 2003), die eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Standorte und Arten erschweren (STOKES et al. 2010). Daher wurden die Messungen unter konstanten Temperaturbedingungen von 25°C und einer konstanten PAR Quantenstromdichte von 1600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$ durchgeführt. Mit Ausnahme von einigen Tagen mit plötzlich einsetzenden Regenschauern oder Gewittern, wurde der Gaswechsel jeder Art in der Zeit von ca. 08:00 bis maximal 18:00 Uhr mitteleuropäischer Sommerzeit (MESZ) erfasst.

Für die Netto-Photosynthese- und Transpirationmessungen müssen CO_2 - und H_2O -Konzentrationen ermittelt werden, was mit Hilfe von Infra-Rot-Gas-Analysatoren (IRGA) über die spezifischen Absorptionsbanden der gasförmigen Moleküle (H_2O und CO_2) erreicht wird. Dabei arbeitet das Messgerät nach dem Prinzip der Differenzmessung, indem durch zwei Messküvetten (H_2O und CO_2) die jeweilige Konzentration der Moleküle im Eingangs- und Ausgangsluftstrom erfasst wird (vgl. Gleichung 4 und 5). Nach der Kalibrierung des Gerätes und der Erfassung der Messwerte für die Festlegung des Nullpunkts, erfolgte die Umstellung in den Messmodus. Nach der Fixierung des Blattes in der Messkammer, wurde die Messung bis zur Erreichung einer konstanten Netto-Photosyntheserate durchgeführt.

Im Folgenden sind die Gleichungen, nach denen die Netto-Photosynthese (Gleichung 13) und die Transpiration (Gleichung 3.12) berechnet wurden (VON CAEMMERER & FARQUHAR 1981) aufgeführt.

$$E = \frac{u_e * (w_o - w_e)}{LA * (1 - w_o)} \quad (3.12)$$

$$NP = \frac{u_e}{LA} * \frac{1 - w_e}{1 - w_o} * (c_e - c_o) - E * c_e \quad (3.13)$$

NP Netto-Photosyntheserate CO_2 [$\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$]

u_e molarer Fluss am Messküvetteneingang während eines Messpunktes MP [mmol s^{-1}]

LA Bezugsgröße, hier als Blattfläche [cm^2]

w_e	H ₂ O-Stoffmengenanteil am Messküvetteneingang [ppm]
w_o	H ₂ O-Stoffmengenanteil am Messküvettenausgang [ppm]
c_e	CO ₂ -Stoffmengenanteil am Messküvetteneingang [ppm]
c_o	CO ₂ -Stoffmengenanteil am Messküvettenausgang [ppm]
E	Transpirationsrate H ₂ O [mmol s ⁻¹]

3.7.2 Wassernutzungskoeffizient (WUE)

Aus den beiden Parametern Netto-Photosyntheserate und Transpiration lässt sich die spezifische Leistungsfähigkeit, die Effizienz der Wassernutzung oder auch Wasserausnutzungskoeffizient der Photosynthese (WUE, water use efficiency) (LARCHER 2001) ermitteln, die als wichtiger Parameter zur sippenspezifischen Beschreibung der Effizienz der Netto-Photosynthese unter limitierter Wasserversorgung gilt (MORISON et al. 2008). Zur Berechnung der WUE wurde der Quotient aus dem in der Netto-Photosynthese aufgenommenen CO₂ und des in der Transpiration abgegebenen H₂O gebildet (Gleichung 3.14).

$$WUE = \frac{NP}{E} \quad (3.14)$$

WUE Effizienz der Wassernutzung [μmol/m²s⁻¹/ mmol s⁻¹]

Der Wasserausnutzungskoeffizient der Photosynthese ist dabei letztlich eine Größe, die alle Funktionen der Vermeidung von Trockenstress, der Trockenstresstoleranz und alle Stoffwechselfvorgänge, inklusive der Nährstoffversorgung integriert (FIELD 1983, GUTSCHICK 1999). Zukünftig sollten auf trockenen Standorten Pflanzungen von Arten mit einer geringen WUE vermieden und verstärkt Arten mit einer hohen WUE gefördert werden.

3.8 Statistische Auswertung der Gaswechselanalytik und des Wasserhaushaltes

Die Datensätze wurden zuerst mit dem Shapiro-Wilk-Test ($P \leq 0.05$) (SHAPIRO & WILK 1965) auf Normalverteilung kontrolliert. In Fällen, in denen keine Normalverteilung vorlag, wurden die Datensätze mit dem nicht-parametrische H-Test nach Kruskal-Wallis (SACHS & HEDDERICH 2006) überprüft. Lieferten die H-Werte signifikante Unterschiede, wurde der Mann-Whitney-U-Test angewendet, um zu testen welche Datensätze sich signifikant unterscheiden. Wurde für die Daten eine Normalverteilung festgestellt, konnten die

Signifikanzen mit einer ANOVA überprüft werden. In Fällen von statistisch nachweisbaren Unterschieden, wurde der Tukey-Test ($P \leq 0.05$) nachgestellt, um eine Lokalisierung der Differenzen zwischen den Datenreihen zu erreichen.

Zur Prüfung auf lineare und nicht-lineare Abhängigkeiten zwischen den untersuchten Parametern wurden Regressionsanalysen und der Spearman-Rang-Korrelationstest verwendet. Für den Vergleich der Ergebnisse wurde in den entsprechenden Tabellen und Graphiken der Median und die Standardabweichung berechnet.

4 Ergebnisse

4.1 Datierung und Synchronisation

Der dendrochronologische Ansatz der Arbeit beinhaltet die Untersuchung der Wachstumsmuster von insgesamt 503 Bäumen mit insgesamt 1466 Bohrproben für 10 Baumarten. Von Wald- und Stadtbäumen konnten die Proben von 467 Bäumen zu sicher synchronisierten Baumittelkurven zusammengefügt werden (Tab. 4.1). Von den 20 Straßenbaum-Chronologien (S) wurde für 5 Chronologien ein EPS von unter 0,85 ermittelt (Tab. 4.2) und deshalb für die weiteren klimatischen Analysen ausgeschlossen. Damit wurde eine Datengrundlage für die klimatische Interpretation von 7 Standortchronologien für Waldbäume (W), 3 urbane Einzelbaum-Chronologien (E) und für 15 urbane Straßenbaum-Chronologien für den Dresdner Raum geschaffen (Tab. 4.1).

Von den 36 Bäumen, deren Wachstumsmuster nicht für die weitere Auswertung verwendet wurden, waren bis auf zwei Rot-Eichen alle Baumarten zerstreutporige Hölzer mit insgesamt schwer zu erkennenden Jahrringgrenzen. Besondere Probleme bereitete die Analyse der Jahrringmuster der Kultur-Birne. Auf den Standorten Am Hellerrand (AM) und auf der W.-Shakespeare-Straße (WIL) konnte trotz einer Stichprobenentnahme von teilweise vier Proben pro Baum keine sichere Chronologie erstellt werden. Die Gründe dafür sind die sehr eng beieinander liegenden, undeutlichen Jahrringgrenzen und partiellen Jahrringausfällen bzw. auskeilenden Jahrringen sowie sehr individuellen Wachstumsverläufen der Einzelbäume zurückzuführen. Auch für die Gattung *Tilia* war die Chronologiebildung mit Schwierigkeiten im Arbeitsschritt der Datierung verbunden, die auf den genannten Gründen und hier vor allem sehr engen Jahrringgrenzen basierten. Diese Probleme führten für insgesamt 51 Bäume zu einer Kürzung der Zeitreihen. Ein Großteil der Kürzung (74,5%) der Zeitreihen wurde nach dem Jahr 1991 vorgenommen, was sich in einigen Chronologien in einer verminderten Belegungsstärke nach 1991 zeigt (vgl. Abb. 4.1 bis 4.6).

Tabelle 4.1: Übersicht über die Anzahl der beprobten Bäume pro Standort (W = Waldbäume, S = Straßenbäume, E = städtischer Einzelbaum), der sicher datierten Jahrringzeitreihen, der maximal eingefügten Jahrringe pro Radius und pro Baum sowie der Anzahl der gekürzten Chronologien

Baumart	Abk.	Std	Bezeichnung	Bäume (n)	sicher datiert (n)	max. einge. Jahrr. pro Radius	max. einge. Jahrr. pro Baum	gekü. Chro.
<i>Acer platanoides</i>	Apl	S	Berchtesgadener Straße (BER)	13	13			
<i>Acer platanoides</i>	Apl	S	Lilienthalstraße (LIL)	36	36	5	1	5
<i>Acer platanoides</i>	Apl	S	Sachsenwerkstraße (SAC)	6	6	3	2	2
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Aps	S	Sachsenwerkstraße (SAC)	27	24	3	1	2
<i>Fagus sylvatica</i>	Fsy	W	Borsberghänge (BOR)	19	19			
<i>Fagus sylvatica</i>	Fsy	E	Bosewitzer Straße (BOS)	1	1			
<i>Fagus sylvatica</i>	Fsy	W	Friedrichsgrund (FRI)	16	16			
<i>Fagus sylvatica</i>	Fsy	W	Kellerbrücke (KEL)	16	16			
<i>Fagus sylvatica</i>	Fsy	W	Prießnitzwasserfall (PRI)	16	16			
<i>Fagus sylvatica</i>	Fsy	E	Waldschlösschenstraße (WSC)	1	1			
<i>Fagus sylvatica</i>	Fsy	E	Wiener Straße (WIE)	2	2			
<i>Platanus x hispanica</i>	Pxh	S	Meixstraße (MEI)	6	0			
<i>Platanus x hispanica</i>	Pxh	S	Robert-Berndt-Straße (ROB)	14	14	4	2	1
<i>Pyrus communis</i>	Pco	S	Am Hellerrand (AM)	8	0			
<i>Pyrus communis</i>	Pco	S	Bernard-Shaw-Straße (BSH)	10	10	16	7	2
<i>Pyrus communis</i>	Pco	S	Försterlingstraße (FOE)	12	12	4	5	4
<i>Pyrus communis</i>	Pco	S	Nussallee (NUS)	57	54	8	3	10
<i>Pyrus communis</i>	Pco	S	W.-Shakespeare-Straße (WIL)	8	0			
<i>Quercus robur</i> subsp. <i>sessiliflora</i>	Qrs	W	Borsberghänge (BOR)	19	19			
<i>Quercus robur</i> subsp. <i>sessiliflora</i>	Qrs	S	Waldschlösschenstraße (WSC)	12	12			
<i>Quercus rubra</i>	Qru	W	Borsberghänge (BOR)	19	19			
<i>Quercus rubra</i>	Qru	S	Käthe-Kollwitz-Platz (KKP)	14	14			
<i>Quercus rubra</i>	Qru	S	Robert-Berndt-Straße (ROB)	10	10			
<i>Quercus rubra</i>	Qru	S	Stübelallee (STU)	48	48			
<i>Quercus rubra</i>	Qru	S	Stübelallee (STUJ)	12	10			
<i>Quercus rubra</i>	Qru	S	Zschierener Straße (ZSC)	10	10			
<i>Tilia cordata</i>	Tco	W	Borsberghänge (BOR)	18	12	6	3	2
<i>Tilia cordata</i>	Tco	S	Tronitzer Straße (TRO)	10	10	12	5	4
<i>Tilia platyphyllos</i>	Tpl	S	Krippener Straße (KRI)	14	14	7	5	2
<i>Tilia platyphyllos</i>	Tpl	S	Meußlitzer Straße (MEU)	12	12	12	7	4
<i>Tilia platyphyllos</i>	Tpl	S	Peter-Schmoll-Straße (PSC)	13	13	8	4	3
<i>Tilia platyphyllos</i>	Tpl	S	Tronitzer Straße (TRO)	12	12	13	9	5
<i>Tilia x vulgaris</i>	Txv	S	Tronitzer Straße (TRO)	12	12	8	8	5

4.2 Wachstumsbeschreibung

Die Zeitreihen der einzelnen Zuwachsmessungen wurden jeweils zu einer Standortchronologie je Art gemittelt. Anhand dieser Chronologie wurden das Reaktionsverhalten sowie der Zuwachsverlauf für die Arten verglichen. In Tabelle 4.2 sind die wesentlichen Parameter zur Wachstumsbeschreibung der Standortchronologien zusammengestellt. Mit Ausnahme für die städtischen Einzelbäume der Rot-Buche (Abb. 4.2, rechts), sind alle Chronologien erst ab einer Belegungsstärke von vier Baummittelkurven aufgeführt. Angaben zu den nachfolgend verwendeten Abkürzungen der Baumarten und Standorte finden sich in Tabelle 4.1.

Die Chronologien der Stadtbäume lassen häufig einen starkes Jugendwachstums erkennen, da sich die Mehrzahl dieser Bäume aufgrund der homogenen Altersverteilung der Chronologien in der gleichen Entwicklungsphase befindet. Vier städtische Chronologien (AplBER, FsyBOS, PxhROB, QruKKP, Abkürzungen in Tab. 4.1) zeigen in den ersten 10 bis 20 Jahren einzelne Jahreszuwächse von über 0,8 cm, die in späteren Entwicklungsphasen nicht wieder erreicht wurden. Eine Ausnahme hiervon ist ein städtischer Einzelbaum der Rot-Buche (FsyWSC), der gleichzeitig die am weitesten zurückreichende Chronologie (1849 bis 2007) bildet (Abb. 4.1, rechts). Hier konnten die stärksten Zuwächse um das Jahr 1960 ermittelt werden, in einer Zeit in der der Baum schon mehr als 100 Jahre alt war. Beide Chronologien der Trauben-Eiche (Abb. 4.4, links) zeigen in den letzten fünf Jahrzehnten eine beständige, aber nur leichte Abnahme des jährlichen Radialwachstums. Alle anderen Baumarten lassen stärkere Zuwachsrückgänge erkennen. Beispiele für eine besonders reduzierte jährliche Zuwachsleistung geben die Wachstumsmuster der drei Chronologien der Kultur-Birne, die in den letzten fünf Jahren einen jährlichen Zuwachs von 0,15 cm nicht überschreiten (Abb. 4.3). Für alle Chronologien einer Art lässt sich beobachten, dass sich die jährlichen Radialzuwächse und damit auch das Zuwachsniveau im letzten Jahrzehnt zunehmend angleichen.

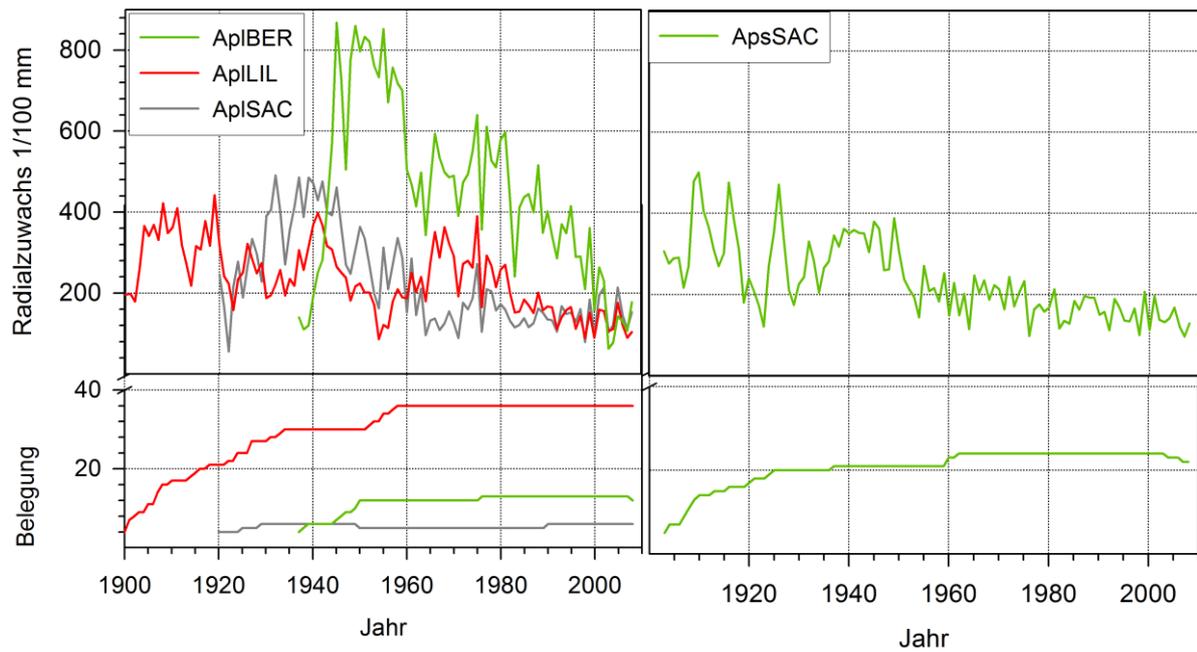


Abbildung 4.1: Standortchronologien der Spitz-Ahorne (Apl, links) und des Berg-Ahorns (Aps, rechts) sowie deren Belegung

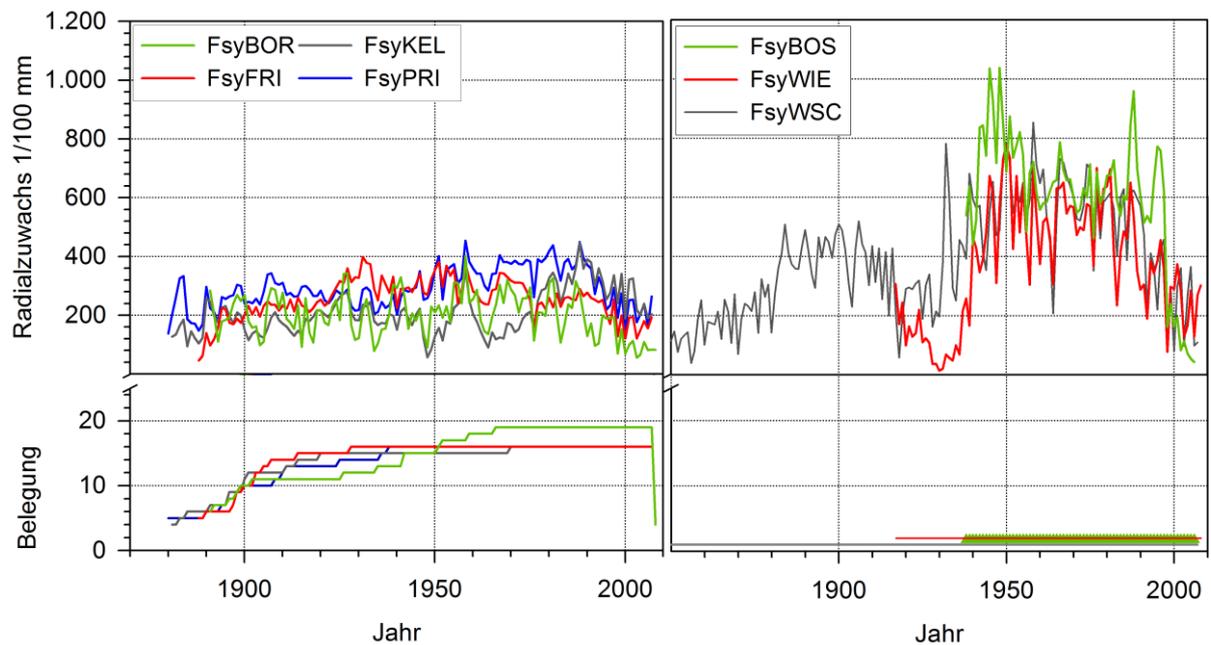


Abbildung 4.2: Standortchronologien der Waldbäume (links) und der Einzelbäume im städtischen Raum (rechts) der Rot-Buchen (Fsy) sowie deren Belegung

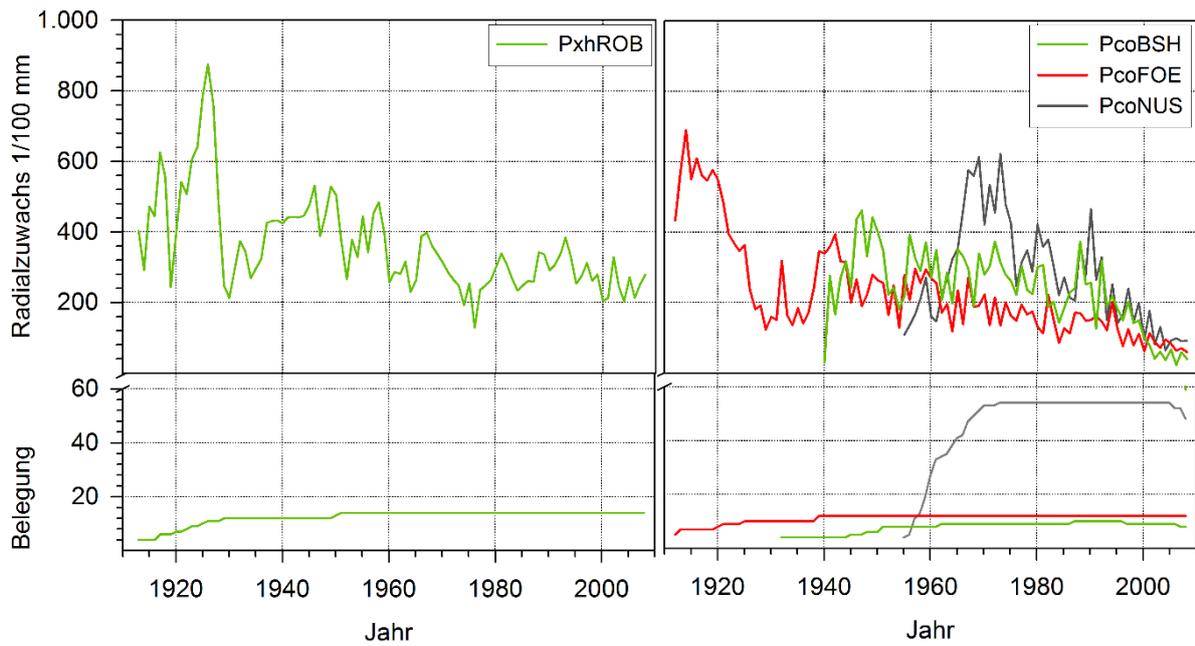


Abbildung 4.3: Standortchronologien der Ahornblättrigen Platane (Pxx, links) und der Kultur-Birne (Pco, rechts) sowie deren Belegung

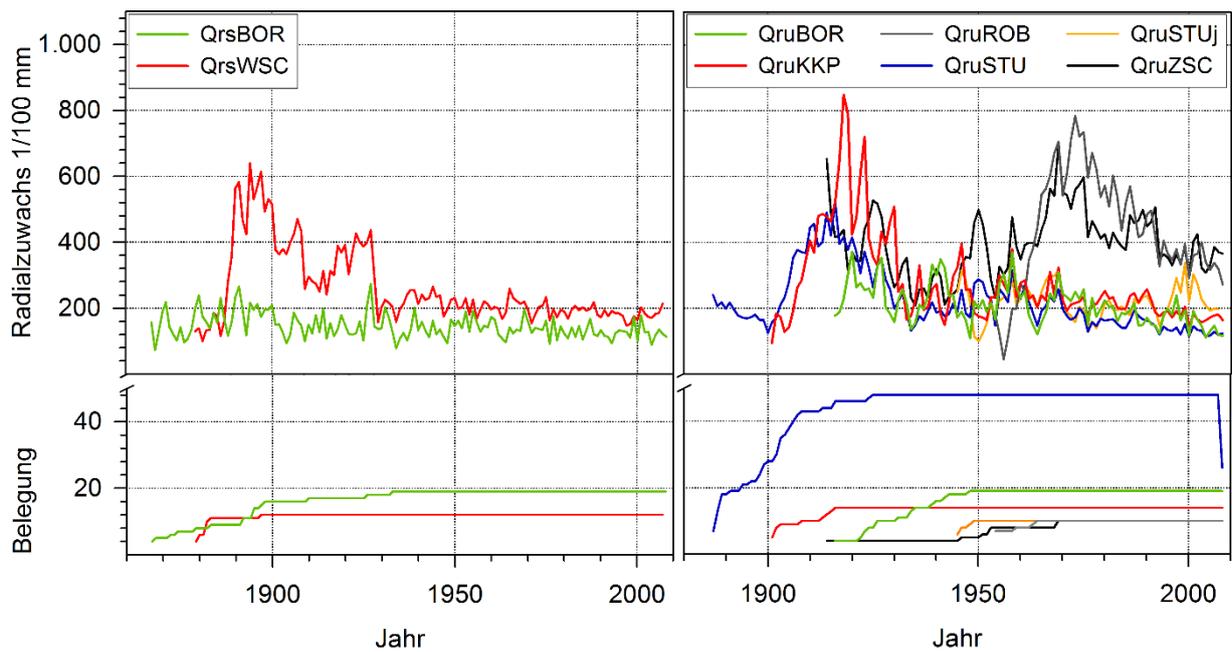


Abbildung 4.4: Standortchronologien der Trauben-Eichen (Qrs, links) und der Rot-Eichen (Qru, rechts) sowie deren Belegung

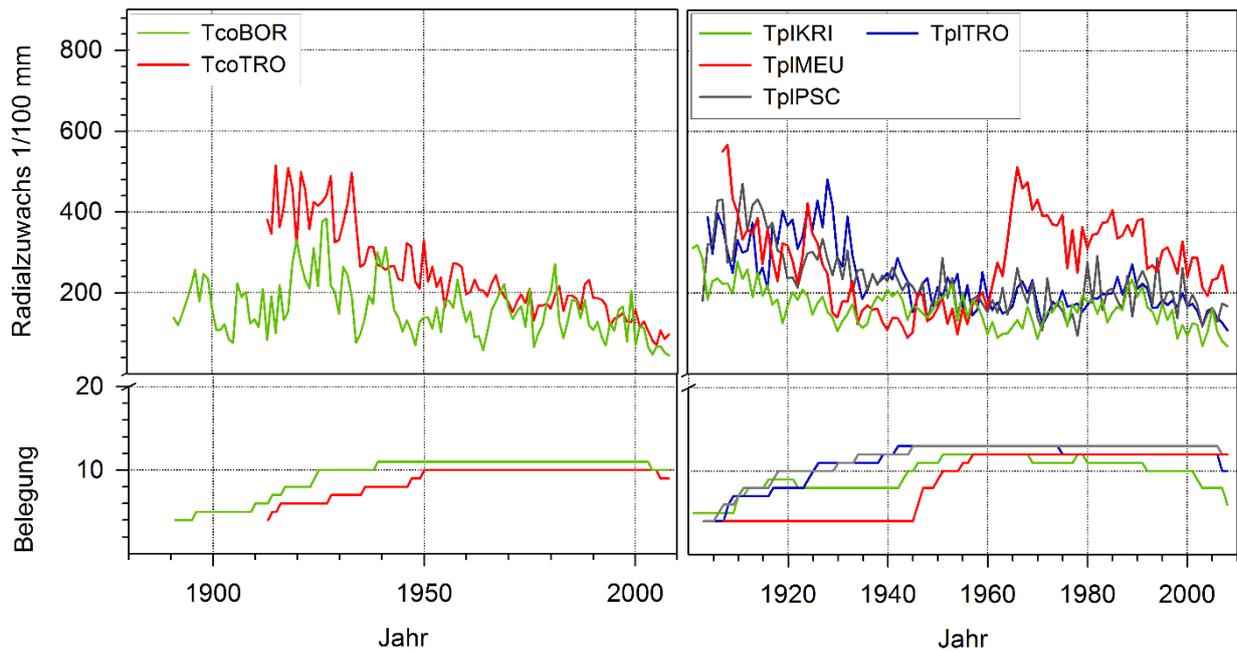


Abbildung 4.5: Standortchronologien der Winter-Linde (Tco, links) und der Sommer-Linde (Tpi, rechts) sowie deren Belegung

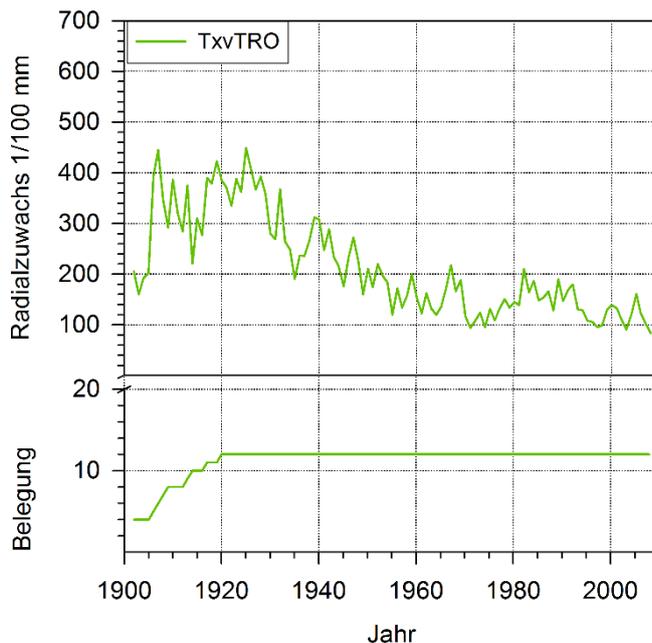


Abbildung 4.6: Standortchronologie der Holländischen Linde (Txv) sowie deren Belegung

Die Standortchronologie der Sommer-Linde auf der Meußlitzer Straße (TpiMEU, Abb. 4.5, rechts) wurde aus vier Bäumen mit einem Mindestalter von 104 Jahren und aus acht Bäumen mit einem Mindestalter von nur 61 Jahren gebildet. Diese Tatsache erklärt die hohen jährlichen Radialzuwächse nach 1965, die auf die Jugendphase der jüngeren Gruppe der Sommer-Linden fallen. Im Folgenden sind die statistischen Kennzahlen der Standortchronologien zusammengefasst dargestellt (Tab. 4.2). Insgesamt lassen sich für vier Chronologien EPS-Werte unter 0,85 feststellen, was zum Ausschluss der Chronologie für die

weitere klimatische Auswertung führte. Für die drei Einzelbaum-Chronologien der Rot-Buche konnte kein EPS berechnet werden.

Tabelle 4.2: Deskriptive Statistik der datierten Standortchronologien ab einer Anzahl von vier Baummittelkurven. Berechnungsgrundlagen: a = Rohwerte, b = standardisierte ARSTAN Chronologie vor der autoregressiven Modellierung, c = residual ARSTAN Chronologie. Der ausgeschriebene Name der verwendeten Abkürzungen für den Standort findet sich in Tabelle 4. Fett markierte Chronologien (EPS < 0,85) wurden nicht in die klimatische Auswertung einbezogen.

Art Abk.	Standort Abk.	Periode (n>4)	Mittl. jährl. Radialzuwachs ± Std. [mm] a	Mittl. Sens. b	Autok. (1.Ord.) b	Mittl. EPS c
<i>Acer platanoides</i>						
Apl	BER	1938-2008	4,54 ± 2,14	0,33	0,50	0,92
Apl	LIL	1900-2008	2,35 ± 0,85	0,38	0,37	0,93
Apl	SAC	1920-2008	2,27 ± 1,15	0,41	0,26	0,85
<i>Acer pseudoplatanus</i>						
Aps	SAC	1903-2008	2,34 ± 0,92	0,41	0,27	0,88
<i>Fagus sylvatica</i>						
Fsy	BOR	1891-2008	2,00 ± 0,74	0,38	0,32	0,97
Fsy	BOS	1938-2006	6,05 ± 2,25	0,19	0,67	-
Fsy	FRI	1888-2007	2,53 ± 0,68	0,21	0,41	0,92
Fsy	KEL	1881-2007	2,08 ± 0,74	0,25	0,62	0,93
Fsy	PRI	1880-2007	2,91 ± 0,70	0,21	0,39	0,89
Fsy	WSC	1849-2007	3,89 ± 1,89	0,35	0,10	-
Fsy	WIE	1917-2008	3,74 ± 2,06	0,36	0,44	-
<i>Platanus x hispanica</i>						
Pxh	ROB	1913-2008	3,59 ± 1,32	0,27	0,59	0,90
<i>Pyrus communis</i>						
Pco	BSH	1940-2008	2,45 ± 1,01	0,48	0,29	0,86
Pco	FOE	1913-2008	2,28 ± 1,38	0,39	0,29	0,88
Pco	NUS	1955-2008	2,78 ± 1,50	0,46	0,20	0,95
<i>Quercus robur subsp. sessiliflora</i>						
Qrs	BOR	1867-2008	1,42 ± 0,36	0,29	0,20	0,95
Qrs	WSC	1879-2007	2,60 ± 1,16	0,21	0,59	0,89
<i>Quercus rubra</i>						
Qru	BOR	1916-2008	2,11 ± 0,61	0,25	0,43	0,95
Qru	KKP	1901-2008	2,77 ± 1,37	0,22	0,55	0,95
Qru	ROB	1954-2008	4,40 ± 1,72	0,20	0,64	0,88
Qru	STU	1887-2008	2,22 ± 0,91	0,20	0,61	0,98
Qru	STUJ	1945-2008	2,18 ± 0,51	0,23	0,60	0,79
Qru	ZSC	1914-2008	3,95 ± 0,99	0,19	0,52	0,88
<i>Tilia cordata</i>						
Tco	BOR	1891-2008	1,60 ± 0,70	0,42	0,35	0,92
Tco	TRO	1916-2008	2,43 ± 1,06	0,34	0,30	0,85
<i>Tilia platyphyllos</i>						
Tpl	KRI	1901-2008	1,64 ± 0,50	0,32	0,41	0,86
Tpl	MEU	1907-2008	2,75 ± 1,08	0,29	0,47	0,80
Tpl	PSC	1903-2008	2,29 ± 0,79	0,36	0,18	0,85
Tpl	TRO	1904-2008	2,34 ± 0,82	0,29	0,36	0,71
<i>Tilia x vulgaris</i>						
Txv	TRO	1902-2008	2,15 ± 0,98	0,30	0,37	0,77

Um eine Vergleichbarkeit der mittleren Sensitivität und der Autokorrelation der unterschiedlich weit zurückreichenden Chronologien, der unterschiedlichen Standorte und Arten unterschiedlicher Altersklassen zu gewährleisten, wurden die Werte der standardisierten Chronologien vor dem Schritt der autoregressiven Modellierung verwendet (Tabelle 4.2). Alle drei Chronologien der Kultur-Birne und die vier Chronologien der beiden Ahornarten weisen eine hohe mittlere Sensitivität bei gleichzeitig niedriger Autokorrelation auf. Demgegenüber finden sich für die Rot- und Trauben-Eichen inverse Relationen, was durch die hohen Autokorrelationswerte und die niedrigen mittleren Sensitivitäten belegt wird. Die Ergebnisse für die Rot-Buchen streuen standortsabhängig sehr stark. So finden sich für den Einzelbaum der Bosewitzer Straße (FsyBOS) eine sehr geringe mittlere Sensitivität von nur 0,19 und eine Autokorrelation von 0,67. Dagegen zeichnet sich der Einzelbaum der Waldschlösschenstraße (FsyWSC) mit einem Sensitivitätswert von 0,36 bei einer Autokorrelation von 0,10 aus. Die entsprechenden Werte für die Lindenarten und die Ahornblättrige Platane liegen im Mittelfeld zwischen den eben beschriebenen zwei Gruppen.

4.2.1 Beziehungen der Standortchronologien untereinander

Um den Zusammenhang zwischen indexierten Standortchronologien sichtbar zu machen, wurde die Darstellung einer Korrelationsmatrix gewählt. In Abbildung 4.7 sind die signifikanten Korrelationskoeffizienten (95%-Niveau) der Chronologien zueinander in einer farblichen Matrix dargestellt. Die Abgrenzung der Arten durch horizontale und vertikale Linien erlaubt eine schnelle visuelle Erfassung der Stärke der Interaktion zwischen den Arten und den verschiedenen Standorten.

Die Wachstumsmuster von Spitz-Ahorn, Rot-Buche sowie Ahornblättriger Platane zeigen untereinander eine hohe Konformität (orange Felder). Im Vergleich der Lindenarten bzw. der Kultur-Birne mit den restlichen Baumarten ergeben sich in der Mehrzahl keine signifikanten Zusammenhänge (weiße Felder). Daneben lassen sich einige signifikante Korrelationen der Wachstumsmuster unterschiedlicher Arten auf gleichen Flächen oder auf der gleichen Straße (z.B. Sachsenwerkstraße, SAC) feststellen. Dementsprechend häufig interkorrelieren die Wachstumsmuster der Baumarten Rot-Buche, Trauben-Eiche, Rot-Eiche und Winter-Linde auf der Fläche Borsberg (BOR) auf einem signifikanten Niveau. Das gleiche gilt für die Straßenbäume der drei Lindenarten (*T. cordata*, *T. platyphyllos*, *T. x vulgaris*) auf der Tronitzer Straße (TRO) und für die beiden Ahornarten (*A. platanoides*, *A. pseudoplatanus*) auf der Sachsenwerkstraße.

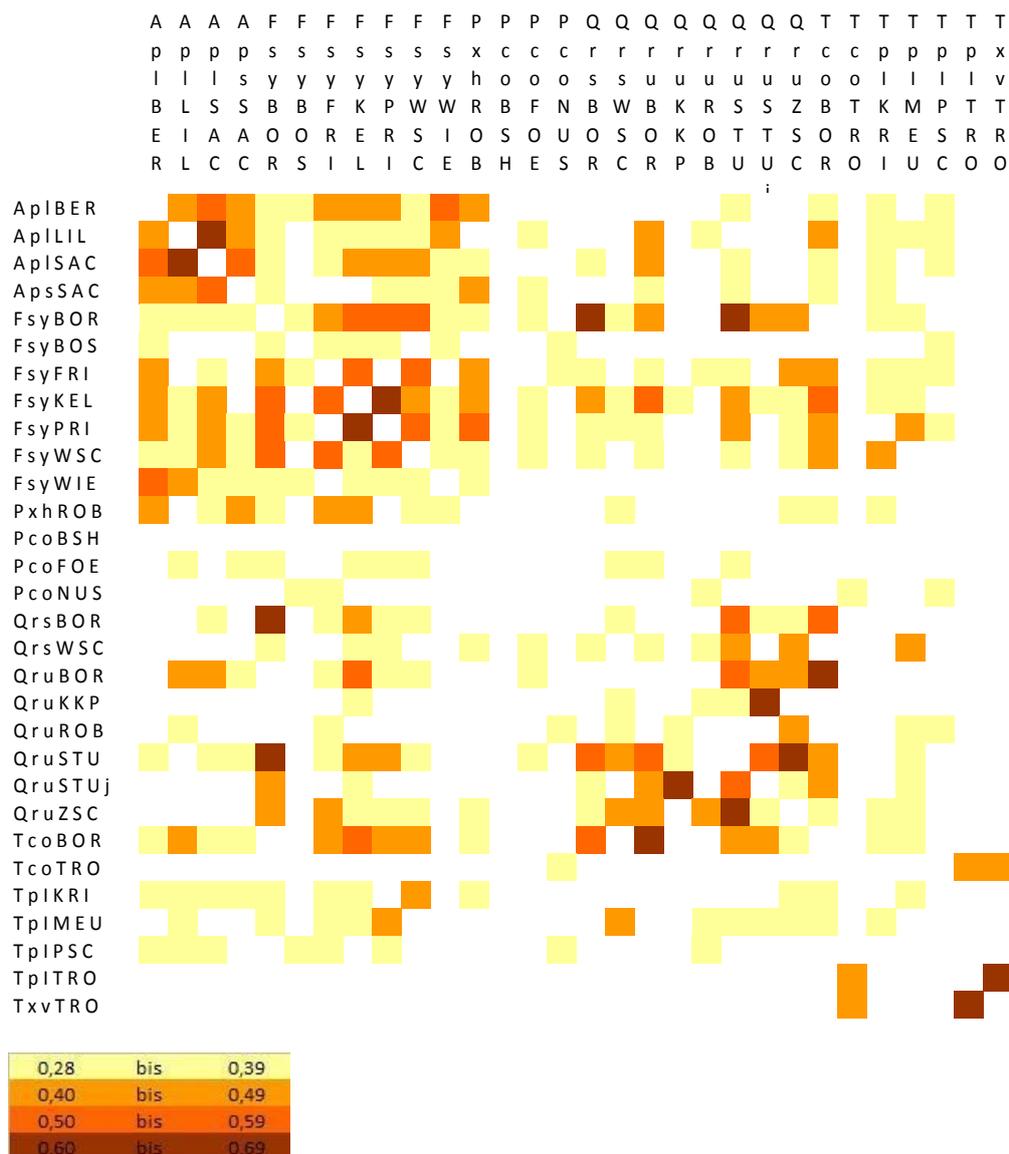


Abbildung 4.7: Korrelationsmatrix zwischen den Standortchronologien über dem jeweiligen Überlappungszeitraum auf dem 95%-Signifikanzniveau (farbige Felder). Angaben zu den Korrelationskoeffizienten und den genutzten Farben unterhalb der Matrix. Übersicht über die verwendeten Abkürzungen für die Arten und Standorte in Tabelle 4.

Dagegen zeigen die drei Chronologien der Kultur-Birnen (PcoBSH, PcoFOE, PcoNUS) nur eine geringe Ähnlichkeit im Zuwachsverhalten mit den übrigen Standorten und Arten. Auch für die Lindenarten, besonders die der Tronitzer Straße, finden sich nur wenige signifikante Übereinstimmungen zu den übrigen Chronologien.

Zur weiteren Prüfung der Ähnlichkeit hinsichtlich des Zuwachses, der Mittleren Sensitivität und der Autokorrelation zwischen den Arten und Standorten wurde eine Hauptkomponentenanalyse angewendet (Abbildung 4.8).

hohe Ähnlichkeit der Wachstumsparameter ermittelt werden. Ebenso wie für die Korrelationsmatrix, finden sich die Chronologien des Borsberges und die Ahornarten auf der Sachsenwerkstraße, also unterschiedliche Arten des gleichen Standorts, auch im Streudiagramm räumlich nahe beieinander, was auf eine hohe Übereinstimmung im Reaktionsverhalten verweist.

4.2.2 Standort und Zuwachs

Jeder Einzelbaum der Straßenstandorte wurde nach seinem Versiegelungsgrad, der Versiegelungsstufe und der Porosität systematisiert. In Abbildung 4.9 sind die aufgenommenen Standortparameter der 20 Straßenbaumstandorte in einem Balkendiagramm veranschaulicht. Je geringer die Versiegelungsstufe nach Renger (1993) bzw. der Versiegelungsgrad nach Blume (1993), desto geringer ist der versiegelte Flächenanteil der jeweiligen Straße.

Mit Ausnahme der Robert-Berndt-Straße befindet sich die Mehrheit der Rot-Eichen (Qru) auf Standorten mit einer geringen Versiegelung.

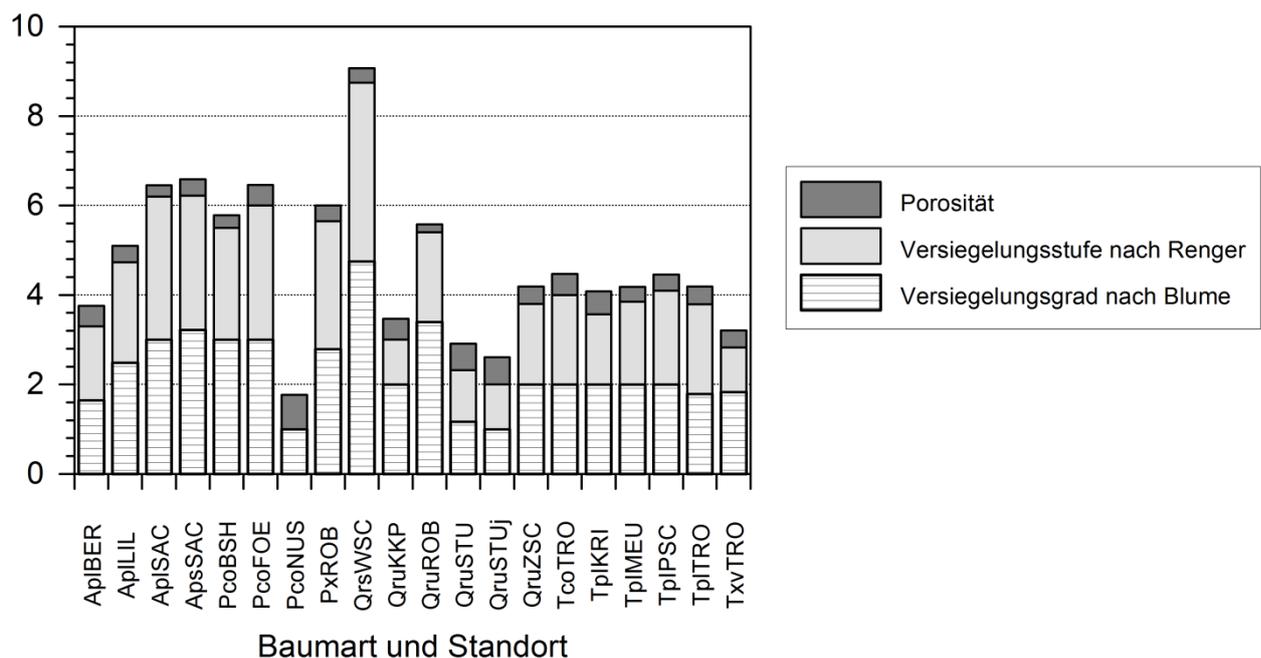


Abbildung 4.9: Mittlere Porosität (Werte zwischen 0 und 1), Versiegelungsstufe nach Renger (1993), Versiegelungsgrad nach Blume (1993) der urbanen Standorte

Dagegen befinden sich die drei Standorte der Ahornarten (Spitz-Ahorn Apl, Berg-Ahorn Aps) auf der Lilienthal- und Sachsenwerkstraße schon in einem Bereich der Versiegelungsstufe zwischen 2,2 bis 3,2. Die städtischen Standorte für die Lindenarten unterscheiden sich in ihrer Klassifizierung nach dem Versiegelungsgrad und der Versiegelungsstufe nur geringfügig.

Um die Straßenbaumstandorte detaillierter miteinander zu vergleichen, wurden die Flächenanteile der verschiedenen Belagsarten im Radius von 10 m um den Stamm (Bereiche des Gehwegs, Straßenbelagsarten) des jeweiligen Baumes erhoben und gemittelt. In der graphischen Darstellung wird die unterschiedliche Porosität, dargestellt in Relativwerten im Vergleich zu natürlichen Böden mittlerer Lagerungsdichte, der Straßenbaumstandorte sichtbar (Abb. 4.10). Je höher die Porosität ist, desto geringer ist auch die Flächenversiegelung und desto besser ist die Durchlässigkeit. Damit ergibt sich eine klare Differenzierung der Standorte. Auf der einen Seite findet man z.B. die Rot-Eichen der Robert-Berndt-Straße (QruROB) auf einem stark versiegelten Straßenbaumstandort. Auf der anderen Seite finden sich Standorte mit einem geringen Anteil an versiegelten Flächen wie die Nussallee (PcoNUS), die Berchtesgadener Straße (ApcBER) oder die Stübelallee (QruSTU). Signifikante Unterschiede der Porosität wurden durch multiple paarweise Vergleiche der mittleren Ränge nach dem χ^2 -Ansatz nach SACHS & HEDDERICH (2006) errechnet und für elf Fälle im Vergleich mit der Nussallee sowie für zwei Fälle im Vergleich mit der Stübelallee nachgewiesen (Abb. 4.10).

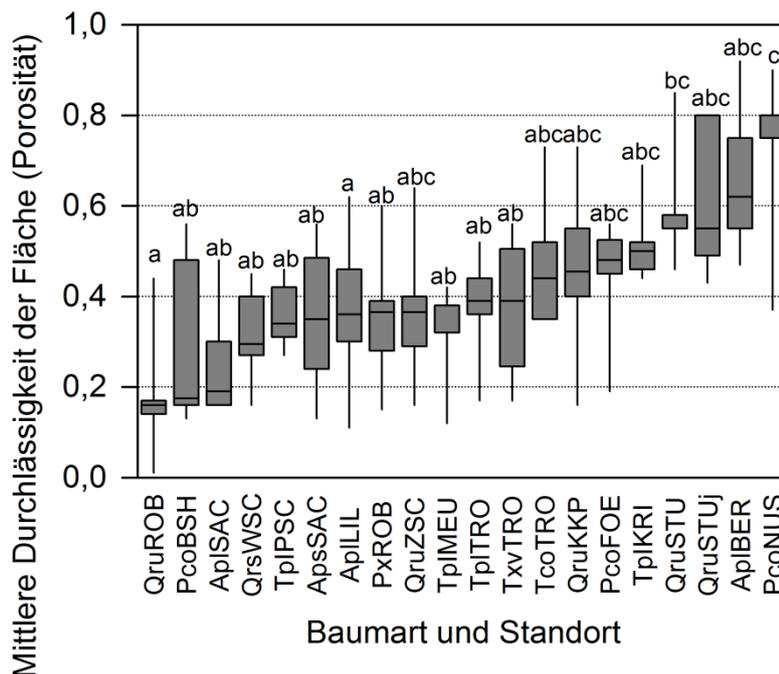


Abbildung 4.10: Darstellung der mittleren Durchlässigkeit (Porosität) der Straßenbaumstandorte mit mehr als 6 Bäumen pro Straße (sortiert nach aufsteigendem Median). Box-Whisker-Plots mit unterschiedlichen Buchstaben oder Buchstabenkombinationen unterschieden sich auf dem 95%-Signifikanzniveau.

Ein Test der Rangkorrelationskoeffizient nach SPEARMAN (Rho) soll Aufschluss über die Beziehung der bisher betrachteten Parameter Mittlere Porosität mit der Mittleren Sensitivität, Autokorrelation sowie BHD und dem mittleren jährlichen Radialzuwachs geben. Die Ergebnisse für die Prüfung einer Abhängigkeit der Wachstumsparameter von der Porosität

sind in Tabelle 4.3 aufgelistet. In neun von 100 Fällen konnten signifikante Koeffizienten ermittelt werden. Diese wenigen signifikanten, positiv korrelierten Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine starke Flächenversiegelung mit Materialien geringer Porosität (z.B. Asphalt = 0,1 (BLUME, 1993)) einen geringen Zuwachs, folglich einen geringen Durchmesser sowie eine geringe Varianz und mittlere Sensitivität bedingen. Eine Abhängigkeit der Autokorrelation von der Porosität des Standortes konnte nicht nachgewiesen werden. Insgesamt können damit keine klaren Unterschiede oder Gemeinsamkeiten im Zuwachsverhalten von Bäumen auf Standorten mit ähnlicher Belagsbeschreibung nachgewiesen werden. So zeigen die Bäume der beiden stark versiegelten Flächen mit einer geringen mittleren Porosität, der Bernhard-Shaw-Straße (PcoBSH) und der Sachsenwerkstraße (AplSAC, ApsSAC), signifikante Abhängigkeiten des jährlichen Radialzuwachses von der Porosität. Dies trifft jedoch nicht für die Bäume mit vergleichbaren Standortbedingungen wie z.B. der Robert-Berndt-Straße (QruROB) oder der Peter-Schmoll-Straße (TplPSC) zu.

Tabelle 4.3: Spearmans Rangkorrelationskoeffizienten (Rho) zwischen Porosität der Straßenbaumstandorte und BHD, mittleren jährlichen Radialzuwachs (Mitt. Zuw.), Varianz sowie die Werte der standardisierten Chronologien der mittleren Sensitivität (Mitt. Sens.) und Autokorrelation (Autok.) (b = standardisierte Werte vor der autoregressiven Modellierung). Signifikante Zusammenhänge auf dem 95%-Signifikanzniveau sind fett markiert.

Art und Standort Abk.	BHD	Mitt. Zuw.	Varianz	Mitt. Sens. b	Autok. (1.Ord.) b
AplBER	-0,09	-0,05	0,03	-0,10	-0,35
AplLIL	-0,20	0,11	0,21	-0,01	-0,19
AplSAC	0,37	0,45	-0,03	0,08	-0,32
ApsSAC	0,25	-0,17	0,28	0,30	-0,09
PcoBSH	0,45	0,60	0,61	-0,17	0,29
PcoFOE	-0,17	-0,34	-0,21	0,84	-0,47
PcoNUS	-0,04	-0,07	0,01	0,28	-0,17
PxhROB	0,69	0,09	-0,16	-0,18	-0,32
QrsWSC	0,01	-0,22	-0,26	-0,57	0,01
QruKKP	0,03	-0,08	0,16	0,09	0,03
QruROB	0,10	-0,04	0,34	0,08	0,23
QruSTU	-0,21	-0,22	-0,20	-0,21	0,02
QruSTUj	-0,10	0,19	0,50	-0,08	0,15
QruZSC	0,14	-0,24	-0,30	-0,02	-0,22
TcoTRO	-0,32	-0,30	-0,46	0,12	-0,10
TplKRI	-0,11	-0,27	-0,19	0,54	-0,30
TplMEU	-0,38	-0,39	-0,16	-0,23	0,04
TplPSC	0,26	0,00	0,20	-0,19	0,21
TplTRO	0,24	0,10	0,03	-0,05	0,11
TxvTRO	-0,37	0,04	0,05	0,20	0,07

4.3 Klima und Zuwachs

Um festzustellen, inwiefern die Zuwachsschwankungen vom langjährigen Klima beeinflusst sind, wurden die indexierten Standortchronologien mit verschiedenen Klimaparametern korreliert. Im folgenden Kapitel werden deshalb die klimatischen Einflüsse anhand der

Temperatur, des Niederschlags und des selbstkalibrierende 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) auf das artspezifische Wachstum in Balkendiagrammen dargestellt.

Die signifikanten Ergebnisse für die Korrelationsanalysen sind zunächst für jede Art getrennt aufgeführt, um Gemeinsamkeiten im Reaktionsverhalten abzuleiten, aber auch um mögliche Beziehungen zu den Standorten herzustellen. Im Anhang (X) sind sämtliche Korrelationskoeffizienten noch einmal tabellarisch für jede Masterchronologie zusammengefasst dargestellt. In Abbildung 4.11 sind die Klima-Zuwachs-Relationen für den **Spitz-Ahorn** illustriert.

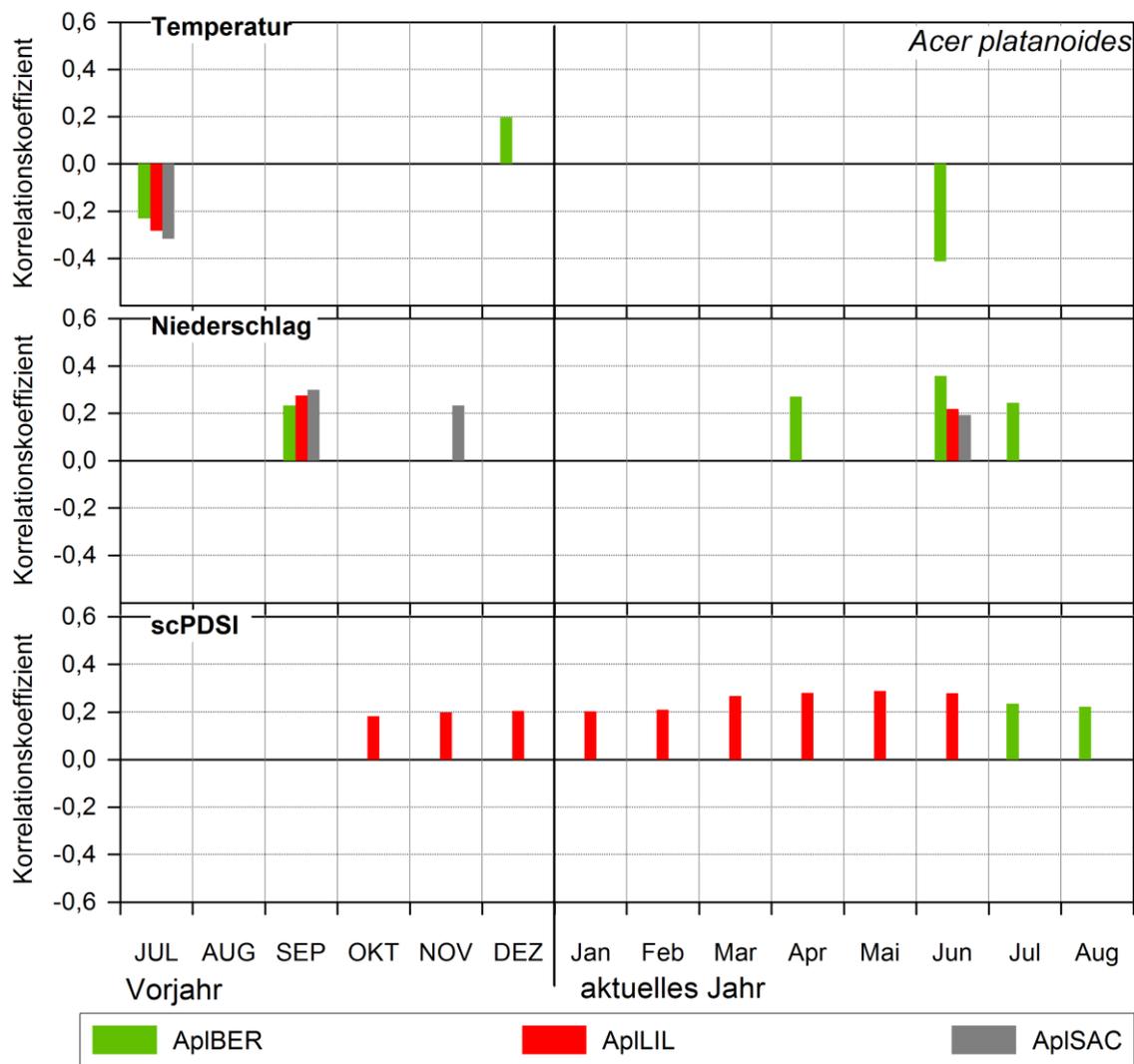


Abbildung 4.11: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Spitz-Ahorn (Apl) für die Standorte Berchtesgadener Straße (BER) im Zeitraum 1955 bis 2007 und der Lilienthalstraße (LIL) sowie Sachsenwerkstraße (SAC) von 1920 bis 2007.

Auf allen Standorten konnte eine Abhängigkeit der Radialzuwächse von den Temperaturen im Vorjahres-Juli und zu den Niederschlägen im Vorjahres-September sowie im Juni des aktuellen Jahres identifiziert werden. Die beiden stark versiegelten Straßenbaumstandorte der

Lilienthalstraße (AplLIL) und der Sachsenwerkstraße (AplSAC) zeigen ein hohes Maß an Übereinstimmungen in der Stärke und im Zeitraum der Korrelationen zur Temperatur und dem Niederschlag. Für die Spitz-Ahorne des gering versiegelten Straßenbaumstandortes (AplBER) wurde eine ausgeprägte Klimaabhängigkeit zu den Temperatur- und Niederschlagsbedingungen ($r = -0,41$; $r = 0,38$) im aktuellen Juni ermittelt. Signifikante Abhängigkeiten des Radialzuwachses vom scPDSI zeigen sich einzig für die Bäume auf der Lilienthalstraße vom März bis Juni, und der Berchtesgadener Straße in den Monaten Juli und August.

Der Radialzuwachs des **Berg-Ahorns** wird primär durch die Niederschläge im Zeitraum Mai bis Juli des aktuellen Jahres bestimmt (Abb. 4.12).

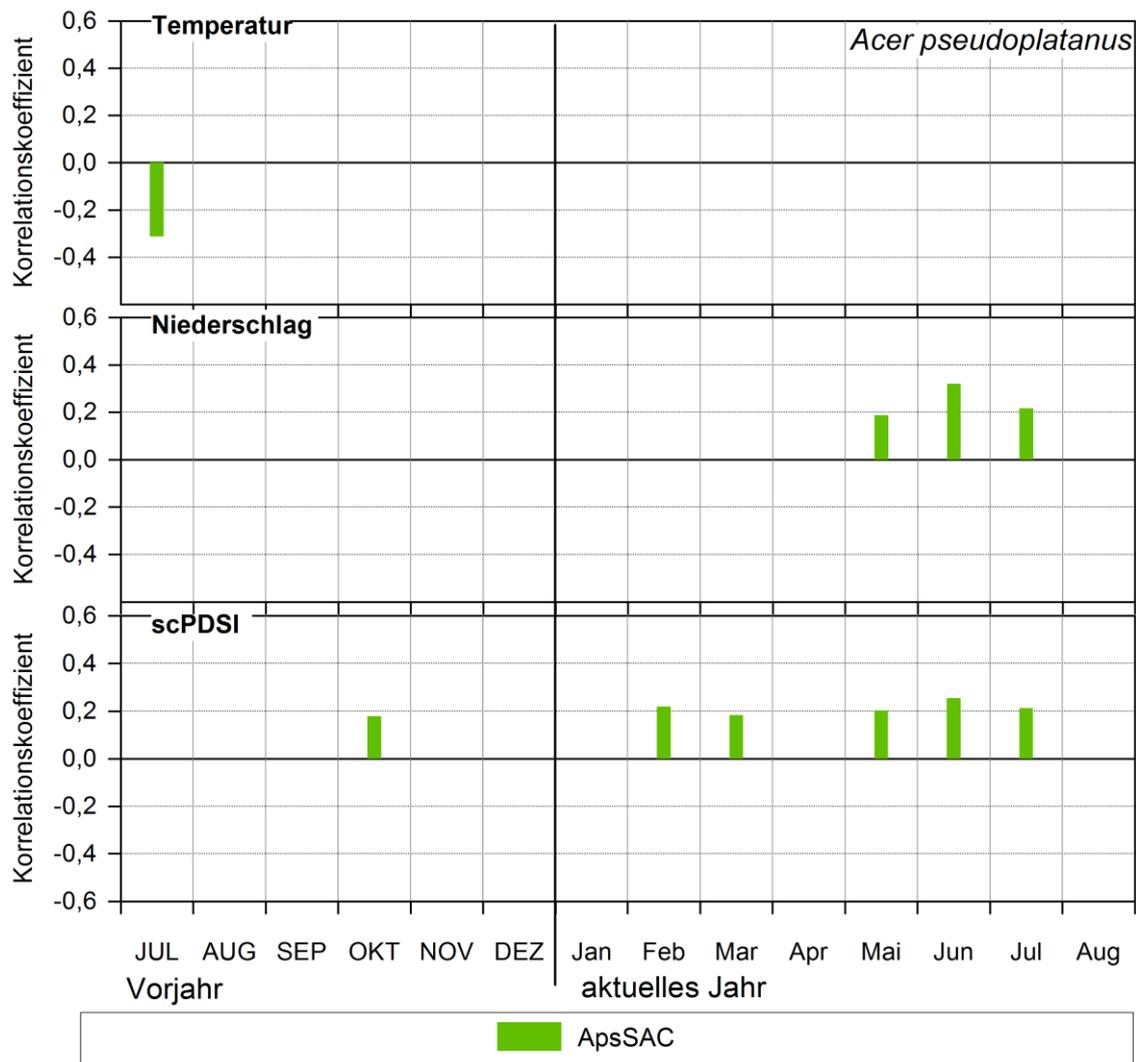


Abbildung 4.12: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen der indexierten Zuwachszeitreihe und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für den Berg-Ahorn (Aps) des Standortes Sachsenwerkstraße (SAC) von 1920 bis 2007.

Hohe Niederschläge in diesem Zeitraum fördern einem hohen Zuwachs. Analog zur Bedeutung der Niederschläge in diesem Zeitraum zeigen sich auch signifikante Relationen

zum scPDSI vom Mai bis Juli mit ähnlich hohen Korrelationskoeffizienten. Zusätzlich verweisen die signifikanten, jedoch schwachen Korrelationen im Vorjahresoktober und im Februar und März auf eine Bedeutung des Feuchtigkeitsangebotes für den Berg-Ahorns in diesen Zeiträumen. Ein statistisch nachweisbarer Einfluss der Temperatur ist nur im Juli des Vorjahres gegeben. Hier wurde ein negativer Korrelationskoeffizient von $r = -0,31$ berechnet. Für eine übersichtliche Darstellung der klimatischen Zuwachsabhängigkeit der Baumart **Rot-Buche** wurden die Ergebnisse für Waldbäume (Abb. 4.13) und Stadtbäume (Abb. 4.14) getrennt abgebildet.

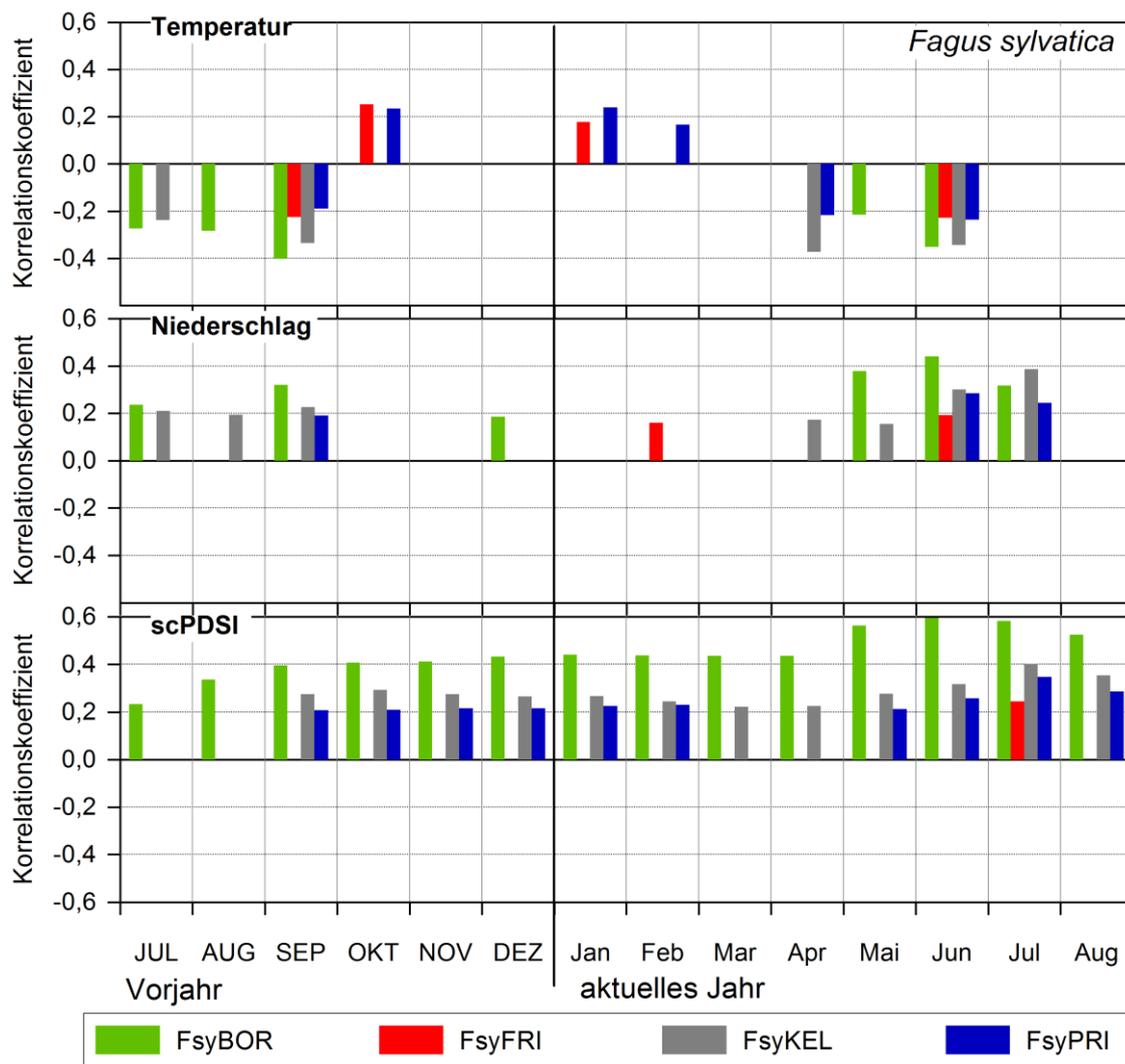


Abbildung 4.13: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Rot-Buche (Fsy) für die trockenen Waldstandorte Borsberghänge (BOR) sowie Kellerbrücke (KEL) und die frischen bis feuchten Waldstandorte Friedrichsgrund (FRI) und Prießnitzwasserfall (PRI) im Zeitraum 1920 bis 2007

Die Chronologien der Waldbäume vereinen den klimatischen Informationsgehalt aus mindestens 16 Baummittelkurven, während die drei städtischen Chronologien Erkenntnisse über den klimatischen Einfluss auf Einzelbäumen vermitteln. Für den Vergleich der

Waldbäume wurden zwei trockene (BOR, KEL) und zwei frische-feuchte Waldstandorte (FRI, PRI) verglichen.

Erwartungsgemäß wurde für die trockenen Waldstandorte eine stärkere klimatische Abhängigkeit und eine höhere Bedeutung des Feuchtigkeitsangebotes (scPDSI) als für die frischen Waldstandorte ermittelt. Die stärksten Zusammenhänge zwischen dem Wachstum und den Klimaparametern finden sich für die Niederschläge ($r = 0,44$) und dem scPDSI ($r = 0,59$) im Juni des aktuellen Jahres für die trockene Fläche des Borsberges (FsyBOR). Jedoch korreliert der scPDSI auch mit den Rot-Buchen des zweiten trockenen Standortes (FsyKEL) und des frischen Standortes des Prießnitzwasserfalls (FsyPRI) in der Mehrzahl der betrachteten Monaten des Vorjahres und aktuellen Jahres signifikant positiv. Anhand der signifikant positive Temperaturkorrelationen im Oktober des Vorjahres für die frischen-feuchten Buchenstandorte werden Differenzen in der klimatischen Wachstumssteuerung zu den trockenen Flächen deutlich. Ein weiterer markanter Unterschied dieser Flächen zeigt sich in Form von signifikant positiven Korrelationen zu den Temperaturen im Januar und Februar, die mit Korrelationskoeffizienten von maximal $r = 0,18$ jedoch nur auf einen geringen Einfluss der Wintertemperaturen auf das Wachstum verweisen. Für alle Standorte gemeinsam lassen sich zwei Monate eingrenzen, in denen die Temperaturen und die Niederschläge von vorrangiger Bedeutung sind. Im Vorjahr sind die Temperaturen im September und im aktuellen Jahr sowohl die Temperaturen als auch die Niederschläge im Juni signifikant zuwachsprägend.

Die Ergebnisse für die städtischen Einzelbäume der Rot-Buche lassen in ihrer Gesamtheit eine geringere klimatische Steuerung des Zuwachses als für die Gruppe der Waldbäume erkennen (Abb. 4.14). Dies zeigt sich besonders auf dem Standort Bosewitzer Straße (FsyBOS), auf dem signifikante Abhängigkeiten des Wachstums vom Klima einzig für die Niederschläge im Vorjahres August und im aktuellen Juli bestehen. Mit Ausnahme für die Rot-Buche der Bosewitzer Straße, sind die Niederschläge am häufigsten signifikant in der laufenden Vegetationsperiode von Mai bis Juli korreliert und die Temperatur ist für alle drei Standorte nur von untergeordneter Bedeutung für den Radialzuwachs. Interessant ist, dass die Zuwachszeitreihen der beiden Einzelbaumchronologien auf der Waldschlösschenstraße (WSC) und der Wiener Straße (Wie) höhere Korrelationskoeffizienten zum scPDSI berechnet wurden als zur Temperatur oder den Niederschlag. Während jedoch für FsyWSC im gesamten Analysezeitraum von Juli des Vorjahres bis August des aktuellen Jahres signifikante Korrelationen zum scPDSI bestehen, zeigen sich für die Rot-Buche FsyWIE nur im aktuellen

Jahr von Mai bis August signifikante Zusammenhänge. Im Vergleich zu den Waldstandorten wurden damit für die Rot-Buche auf der Waldschlösschenstraße vergleichbare Abhängigkeiten zum scPDSI mit den stärksten Korrelationen vom Mai bis August des aktuellen Jahres ermittelt wie für den trockenen Waldstandort FsyKEL.

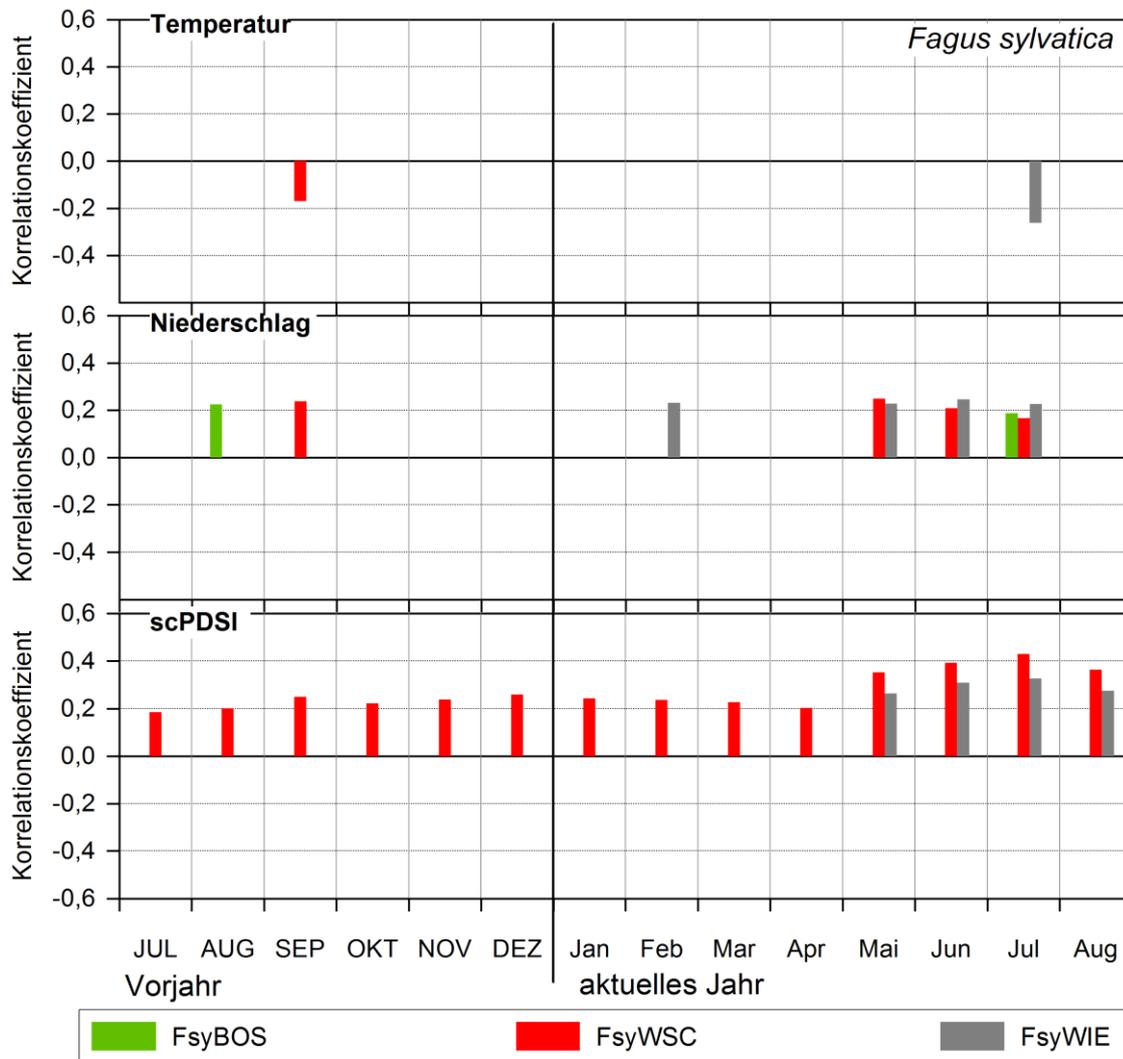


Abbildung 4.14: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Rot-Buche (Fsy) für die drei städtischen Einzelbaumstandorte Boserwitzer Straße (BOS) und Wiener Straße (WIE) im Zeitraum 1955 bis 2007 sowie Waldschlösschenstraße (WSC) von 1920 bis 2007

Die **Ahornblättrige Platane** auf den stark versiegelten Straßenbaumstandort zeigt eine Temperaturabhängigkeit des Radialzuwachses in den drei Monaten von Juli bis September sowie im November des Vorjahres (Abb. 4.15). Im Jahr der Ringbildung ist einzig die Temperatur im Februar, hier positiv, mit dem Radialzuwachs korreliert. Zusätzlich wird der Radialzuwachs nachweisbar von den Niederschlägen im September des Vorjahres, im Februar und den beiden Sommermonaten Juni und Juli beeinflusst. Die höchsten Korrelationskoeffizienten wurde für den Monat Juli zu den Niederschlägen ($r = 0,38$) und im

Monat August zum scPDSI ($r = 0,40$) berechnet. Im gesamten Analysezeitraum wurde eine signifikante Abhängigkeit des Zuwachses vom Feuchtigkeitsangebot (scPDSI) nachgewiesen.

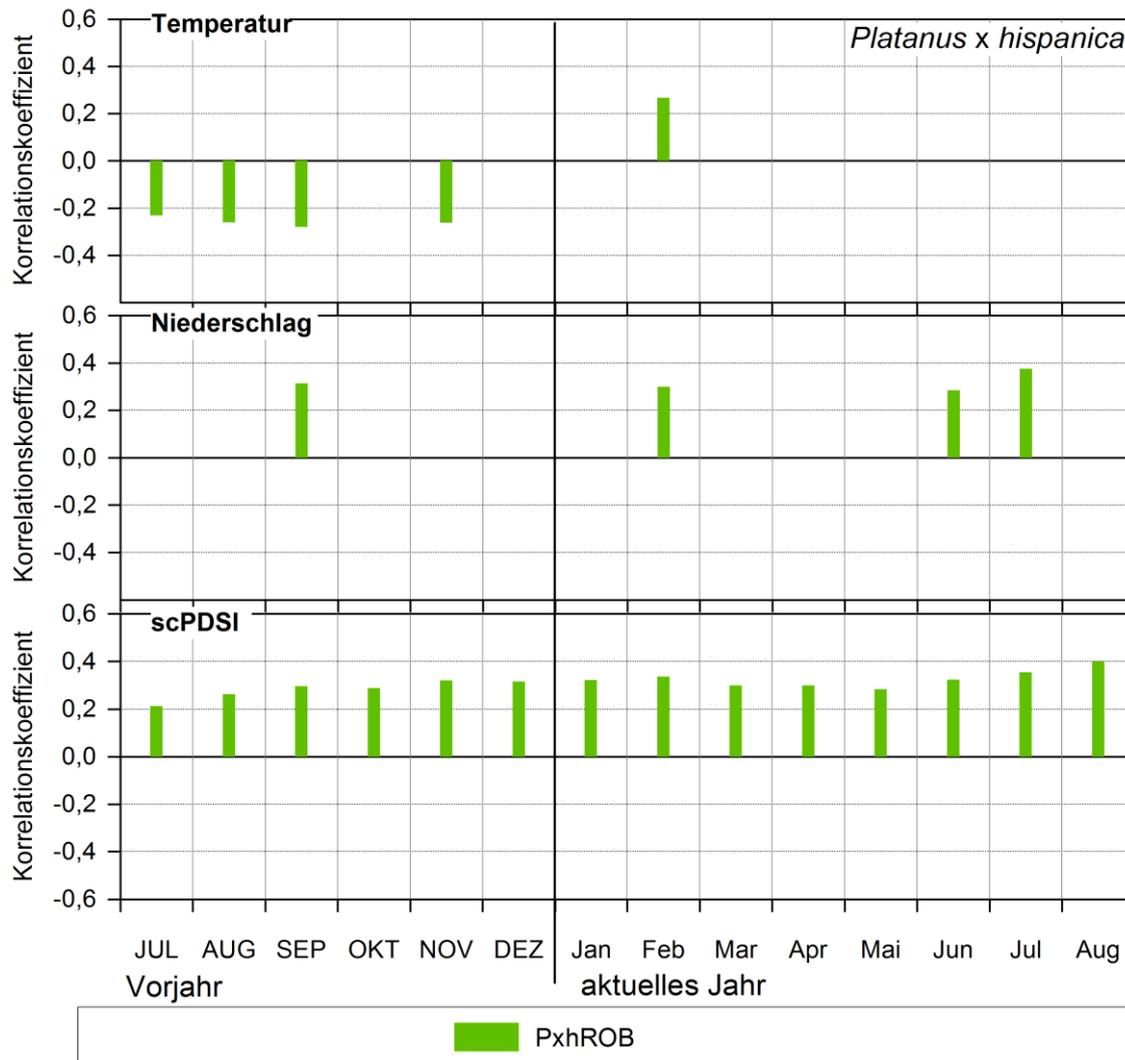


Abbildung 4.15: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen der indexierten Zuwachszeitreihe und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für die Ahornblättrige Platane (Pxr) für die Robert-Berndt-Straße (ROB) von 1920 bis 2007

Die klimatischen Zuwachsanalysen für die **Kultur-Birne** ergeben kaum Gemeinsamkeiten zwischen den drei Standortchronologien (Abb. 4.16). Ähnlichkeiten ergeben sich für die Chronologien in der Beziehung von Temperatur und Zuwachs in den beiden Monaten Juli und August des Vorjahres, mit negativen und vergleichbar hohen Korrelationskoeffizienten. Die Korrelationsanalysen für den Niederschlag zeigen standörtlich stark abweichende Ergebnisse in unterschiedlichen Monaten. Ein interessantes Ergebnis ist die herausragende Bedeutung der Temperaturen im Juli ($r = 0,33$) und August ($r = 0,43$) im Jahr der Ringbildung für die Kultur-Birnen der Nussallee.

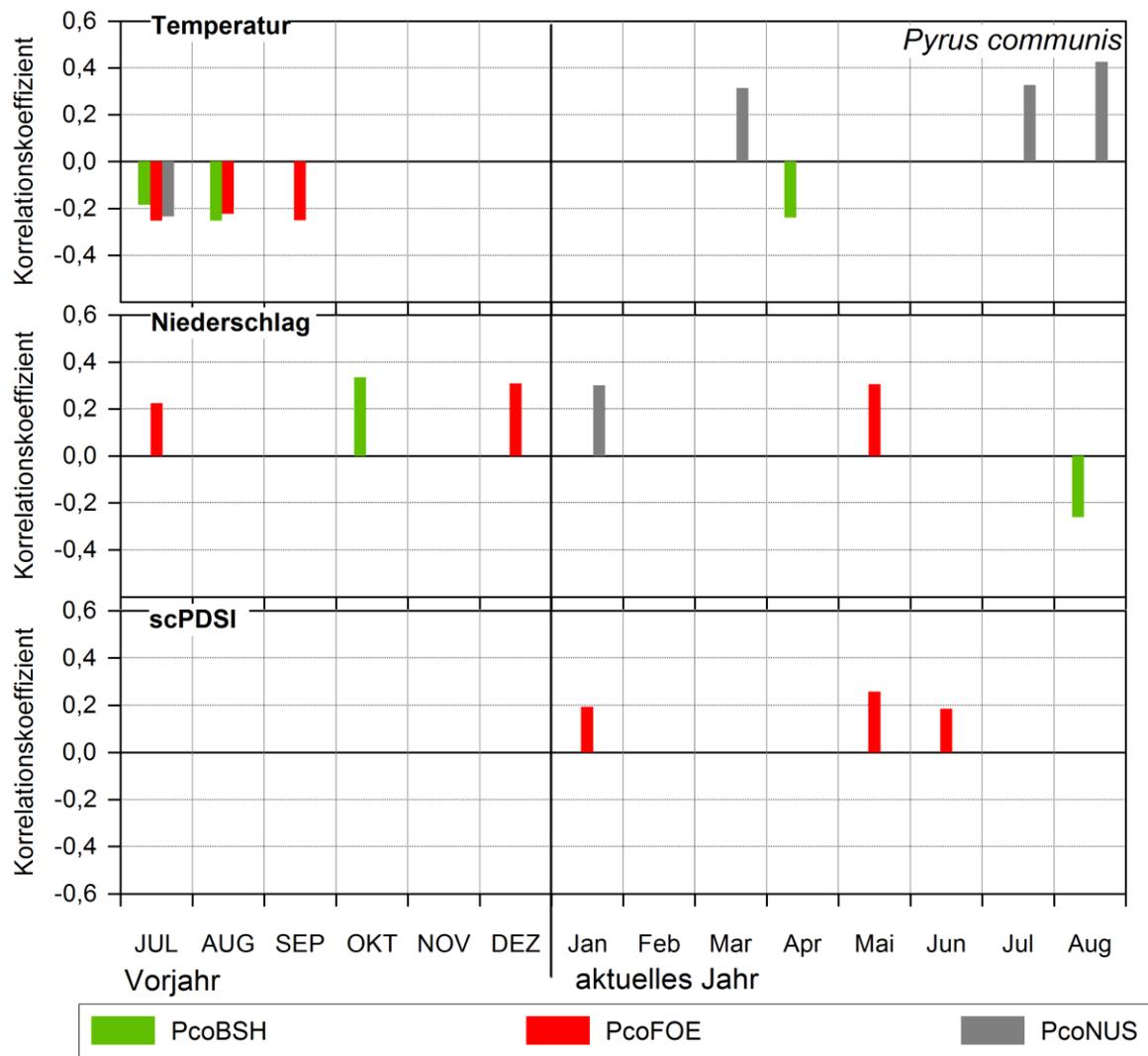


Abbildung 4.16: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für die Kultur-Birne (Pco) für den Standort Försterlingstraße (FOE) von 1920 bis 2007 und für die Standorte (NUS) und Bernard-Shaw-Straße (BSH) von 1955 bis 2007

Für alle anderen Baumarten und Standorte konnte stets ein höherer Anteil negativer Korrelationen zwischen Temperatur und Zuwachs in der aktuellen Vegetationsperiode festgestellt werden. Nur für die Kultur-Birnen der Nussallee wirken sich hohe Temperaturen im Juli und August in einem hohen Radialzuwachs aus. In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, dass die Nussallee die höchste Porosität und die Bernard-Shaw-Straße die zweit geringste Porosität aller städtischen Straßenbaumstandorte aufweist. Die Korrelationsanalyse zum scPDSI ergab nur für die Bäume der Försterlingstraße (FOE) in drei Monaten signifikanten Abhängigkeiten mit Korrelationskoeffizienten von maximal 0,26 im aktuellen Mai.

Auf den trockenen Borsberghängen (QrsBOR) reagieren die **Trauben-Eichen** auf hohe Temperaturen im Vorjahresseptember und in der laufenden Vegetationsperiode von April bis Juni mit einem geringen Zuwachs (Abb. 4.17). Dagegen bewirken hohe Niederschlagsmengen

im August sowie Oktober des Vorjahres und wiederum in den drei Monaten von April bis Juni im aktuellen Jahr einen hohen Zuwachs. Mit Korrelationskoeffizienten von 0,45 bzw. 0,42 zeigen die Trauben-Eichen des trockenen Waldstandortes die stärkste Abhängigkeit von den Niederschlägen und dem scPDSI im aktuellen Juni. Jedoch besteht im gesamten Zeitraum vom September des Vorjahres bis zum August des aktuellen Jahres eine signifikante Abhängigkeit des Wachstums vom scPDSI, die sich für die Abhängigkeit zu den Niederschlägen nicht nachweisen lassen.

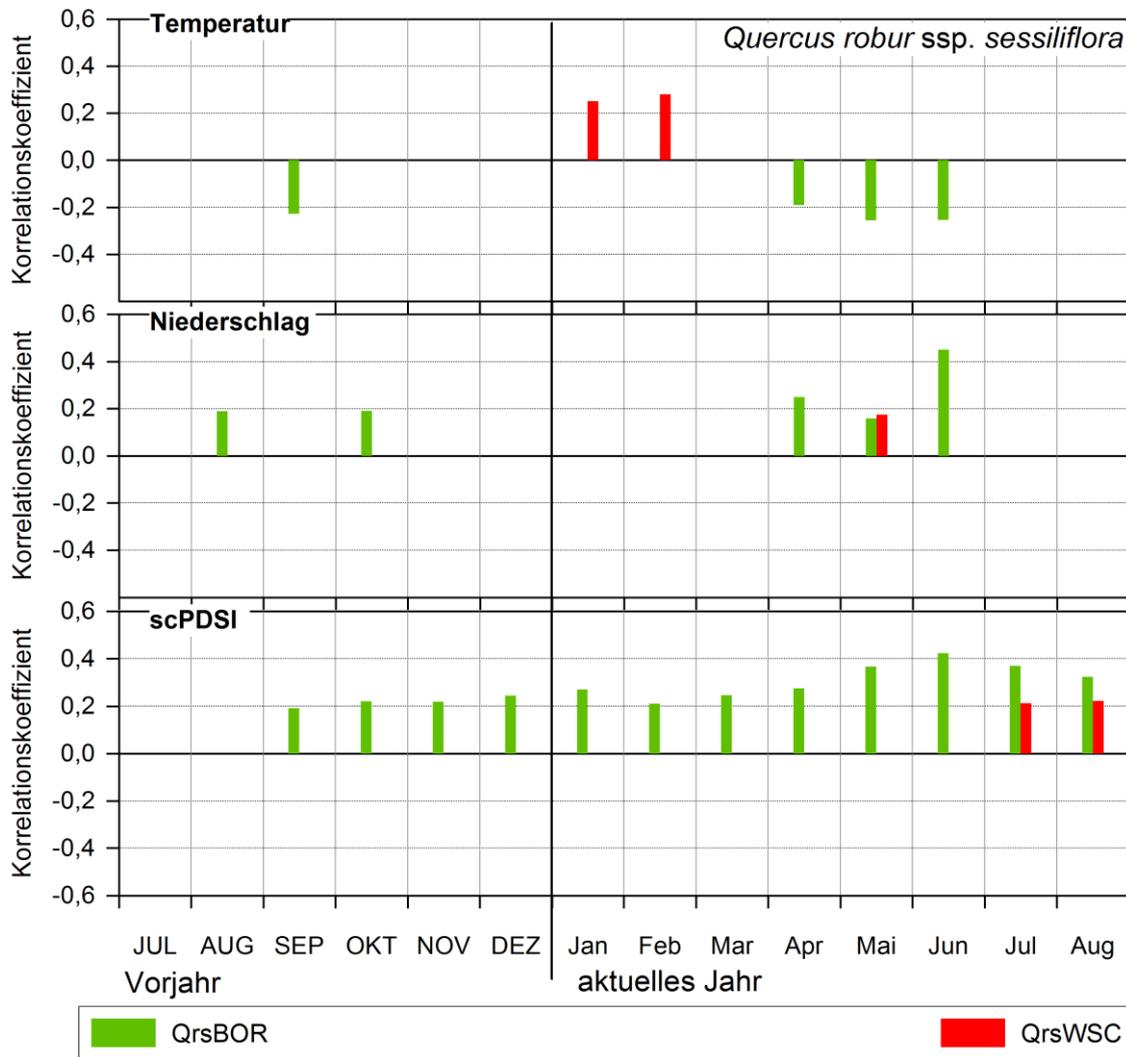


Abbildung 4.17: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für die Trauben-Eiche (Qrs) für den urbanen Standort Waldschlösschenstraße (WSC) sowie den Waldstandort Borsberghänge (BOR) von 1920 bis 2007

Ein konträres Bild der Klima-Zuwachs Relation zeigen die Trauben-Eichen des urbanen Standortes, auf dem das Zuwachsgeschehen primär von den Wintertemperaturen im Januar und Februar bestimmt wird. Geringe Wintertemperaturen äußern sich hier in höheren Zuwächsen. Betrachtet man die Niederschlagsabhängigkeit des Radialzuwachses der Stadtbäume, korrelieren nur die Niederschlagsmengen im Mai des aktuellen Jahres

signifikant. Auch die Beziehung zum Trockenheitsindex ist nur schwach ausgeprägt und einzig für die Monate Juli und August im aktuellen Jahr signifikant.

Genauso wie für die Rot-Buche und die Trauben-Eiche, konnte für die **Rot-Eiche** eine stärkere klimatische Steuerung des Radialzuwachses für die Waldbäume analysiert werden (Abb. 4.18). Für die Waldbäume (QruBOR) ergeben sich in mehreren Monaten signifikante Abhängigkeiten und insgesamt höhere Korrelationskoeffizienten mit einer besonders hohen Bedeutung der Temperatur im Vorjahresseptember und der Niederschläge im Juni des aktuellen Jahres.

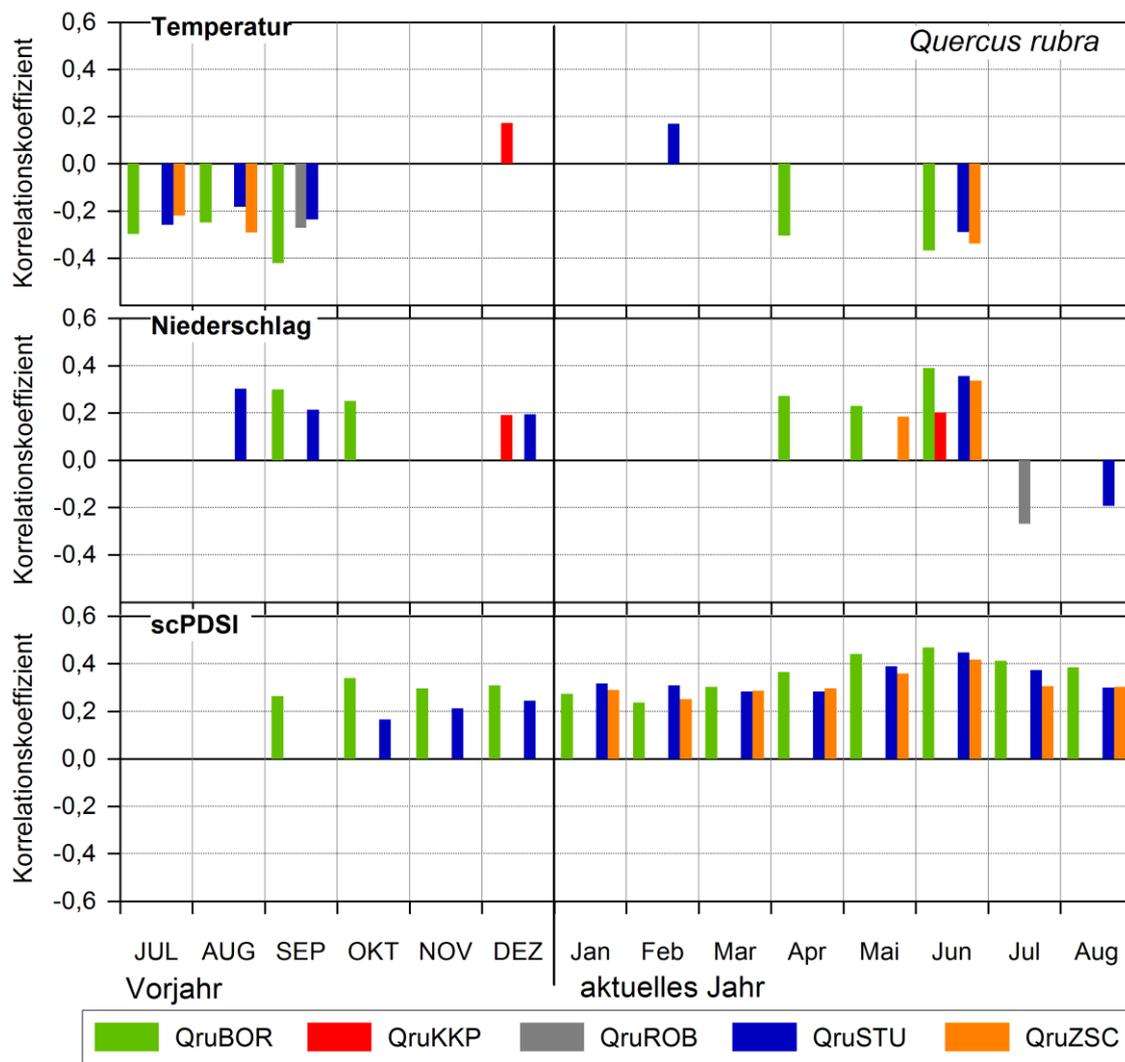


Abbildung 4.18: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für die Rot-Eiche (Qru) der urbanen Standorte Käthe-Kollwitz-Platz (KKP), Stübelallee (STU), Zschierener Straße (ZSC) sowie den Waldstandort Borsberghänge (BOR) von 1920 bis 2007 und für den Standort Robert-Berndt-Straße (Rob) von 1955 bis 2007

Im Zeitraum vom September des Vorjahres bis zum August des aktuellen Jahres, mit Höchstwerten vom Mai bis zum August des aktuellen Jahres, wurden signifikante Zusammenhänge zwischen dem Radialzuwachs und dem scPDSI berechnet.

Für den gesamten Zeitraum vom Vorjahres-Juli bis zum August des aktuellen Jahres fallen zwei Unterschiede auf. So reagieren die beiden Rot-Eichen-Chronologien des Käthe-Kollwitz-Platzes (QruKKP) und der Stübelallee (QruSTU) auf die klimatischen Bedingungen im Winter. Der zweite Unterschied besteht im Zeitraum der Korrelationen im aktuellen Jahr. Für alle Chronologien lässt sich eine Fokussierung der Niederschlagswirkung im Monat Juni des aktuellen Jahres erkennen. Dagegen hat der Niederschlag für die Waldbäume bereits von April bis Juni, also zwei Monate vorher, einen starken Einfluss auf den Zuwachs. Mit Ausnahme von QruROB, zeigen alle Chronologien eine Abhängigkeit vom Trockenheitsindex von Januar bis August des aktuellen Jahres mit besonders starken Relationen vom Mai bis Juli. Die geringste Klimasensitivität besteht für die Rot-Eichen auf der Robert-Berndt-Straße (QruROB), mit signifikanten Zusammenhängen in nur zwei Monaten, zu den Temperaturen im September des Vorjahres und zu den Niederschlägen im Juli des aktuellen Jahres. Dieser Straßenbaumstandort weist die geringste Porosität aller Standorte auf und weicht damit stark von den Standortbedingungen der restlichen Standorte ab (vgl. Abb. 4.10).

Die **Winter-Linde** des Waldstandortes Borsberg (TcoBOR) zeigt eine Zuwachsabhängigkeit von den Vorjahrestemperaturen im Zeitraum Juli bis September sowie zu den Vorjahresniederschlägen im Juli, September und Oktober (Abb. 4.19). Im Jahr der Ringbildung bestimmen beiden betrachteten Klimaparameter das Wachstum hauptsächlich in der Vegetationsperiode von April bis Juli, am stärksten jedoch im Monat Juni (Temp. $r = -0,33$; Ns. $r = 0,37$). Für die Korrelationsanalysen zum scPDSI wurden mit Ausnahme für den Vorjahres-Juli stets höhere Korrelationskoeffizienten berechnet als zur Temperatur und dem Niederschlag. In allen betrachteten Monaten zeigen sich signifikante Abhängigkeiten zum Feuchteangebot. Jedoch wurden ebenso wie für die Temperatur und den Niederschlag, der höchste Korrelationskoeffizient im Juni ermittelt ($r = 0,53$). Für die Stadtbäume (TcoTRO) ist nur eine schwach klimatische Wachstumssteuerung zu beobachten, die sich auf wenige Monate im Vorjahr der Ringbildung beschränkt.

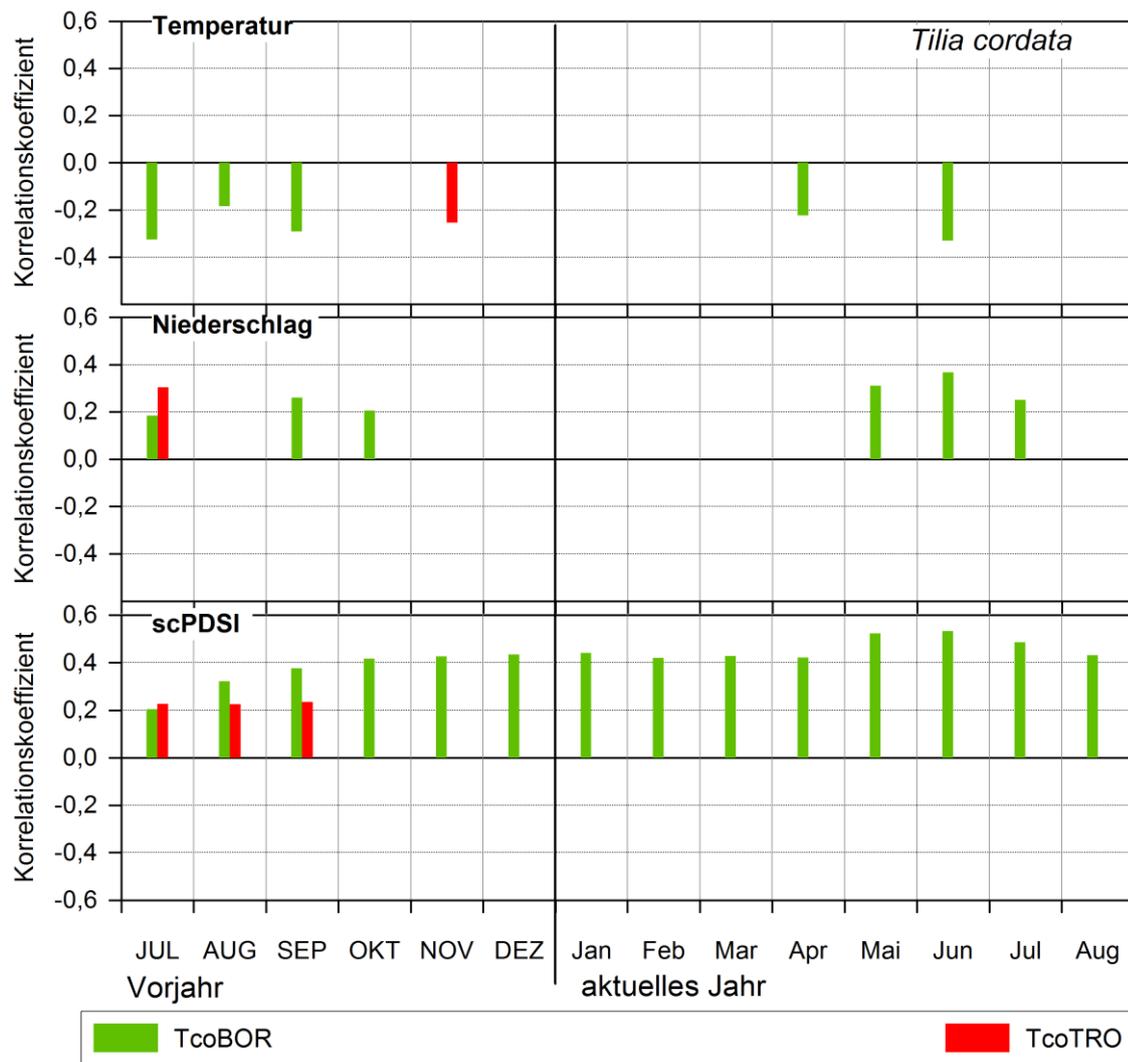


Abbildung 4.19: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur, Niederschlag und dem selbstkalibrierenden 'Palmer Drought Severity Index' (scPDSI) vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für die Winter-Linde (Tco) des Waldstandortes Borsberghänge (BOR) von 1920 bis 2007

Obwohl die Standortbedingungen der **Sommer-Linden** hinsichtlich ihrer Porosität und der Versiegelung vergleichbar sind (vgl. Abb. 4.9 und 4.10), zeigen sich einzig zu den Niederschlägen für den Monat September des Vorjahres und zum scPDSI vom Vorjahres-September bis zum aktuellen Januar übereinstimmend für beide Chronologien positive Korrelationen (Abb. 4.20). Während für die Sommer-Linden auf der Krippener Straße (KRI) die Witterungsbedingungen im aktuellen Juni den stärksten Einfluss auf den Zuwachs ausüben, kann für die Peter-Schmoll-Straße eine signifikante Wirkung der Temperaturen im Vorjahr von Juli bis September und der Niederschläge im September ($r = 0,30$) berechnet werden. Besonders im aktuellen Jahr belegen die hohen und stets signifikanten Korrelationen zum scPDSI für die Krippener Straße die stärkere Bedeutung der Feuchtigkeit für das Wachstum dieses Standortes.

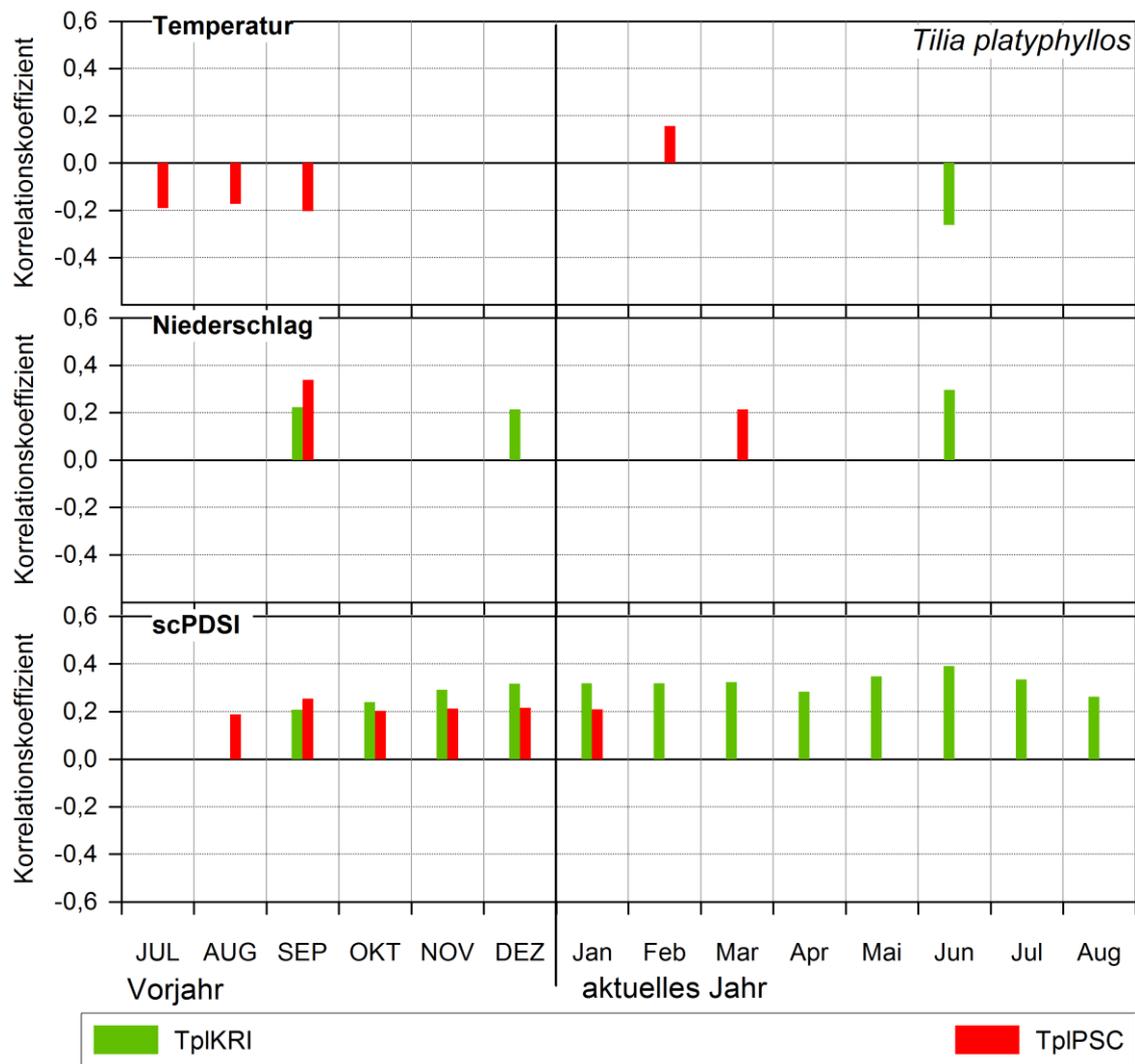


Abbildung 4.20: Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Sommer-Linde (Tpl) der urbanen Standorte Krippener Straße (KRI) und Peter-Schmoll-Straße (PSC) von 1920 bis 2007

Auch für die linearen Regressionsanalysen mit den beiden Parametern Temperatur und Niederschlag im gesamten Zeitraum vom Vorjahres-Juli bis zum aktuellen August, wurde für die Waldbäume eine stärkere klimatische Steuerung als für die Stadtbäume (Tab. 4.4) festgestellt. Eine nachweisbare Temperatur- und Niederschlagsabhängigkeit für den gesamten Zeitraum ist nur für vier (PcoFOE, QruSTU, TcoTRO, TplKRI) der insgesamt 19 urbanen Chronologien gegeben. Dagegen lassen die Regressionsmodelle für alle Waldbaumchronologien des Borsberges (BOR) und der beiden frischen-feuchten Waldstandorte für die Rot-Buche (FRI, PRI) stets einen signifikanten Einfluss auf das Wachstum erkennen. Die besten Approximationen durch die linearen Modelle mit den Variablen Temperatur und Niederschlag ergeben sich für Rot-Buche (korr. $R^2 = 0,55$) und die Trauben-Eiche (korr. $R^2 = 0,53$) des Borsberges (BOR). Dagegen liegt der Anteil der erklärbaren Varianz für die Sommer-Linden auf der Krippener lediglich bei 21%.

Tabelle 4.4: Signifikante Ergebnisse für die Lineare Regressionsanalyse mit sämtlichen Monatswerten der Temperatur und des Niederschlags vom Vorjahres-Juli bis zum aktuellen Jahr im August

Art und Standort	FG	Stdf.	Multiples R²	Korrigiertes R²	F-Test	P-Wert
FsyBOR	60	0,20	0,73	0,55	4,15	0,0000
FsyFRI	60	0,13	0,55	0,27	1,96	0,0050
FsyKEL	60	0,14	0,67	0,48	3,55	0,0000
FsyPRI	60	0,12	0,59	0,36	2,57	0,0001
PcoFOE	60	0,20	0,64	0,30	1,87	0,0162
QrsBOR	60	0,15	0,68	0,53	4,42	0,0000
QruBOR	60	0,15	0,71	0,42	2,45	0,0016
QruSTU	60	0,12	0,60	0,36	2,47	0,0003
TcoBOR	60	0,27	0,59	0,33	2,23	0,0012
TcoTRO	60	0,14	0,71	0,41	2,40	0,0018
TplKRI	60	0,17	0,55	0,21	1,63	0,0368

Um zu testen welche Klimavariablen in welchen Zeiträumen auf den Zuwachs den stärksten Einfluss ausüben, wurden schrittweise Regressionsmodelle verwendet in denen alle Temperaturen und die Niederschläge vom Vorjahres Juli bis zum aktuellen Jahr im August eingebunden wurden. Anschließend wurden mit den selektierten Variablen lineare Regressionsmodelle gebildet (Tab. 4.5).

Mit Ausnahme für die Rot-Eichen der Stübelallee, konnten für die Stadtbäume keine einzelnen Faktoren und Zeiträume gefunden werden, die einen Haupteinfluss der Temperatur- und Niederschlagsabhängigkeit erkennen lassen. Den höchsten Anteil erklärbarer Varianz ($R^2 = 44$) liefert das lineare Regressionsmodell mit insgesamt vier Monaten für den Niederschlag für die Rot-Buchen des Borsberges. Dagegen wurde für die Winter-Linden des gleichen Standortes nur die Temperatur im Juni als Haupteinflussfaktor berechnet und dementsprechend ist hier der Anteil erklärbarer Varianz mit $R^2 = 0,08$ am geringsten. In allen Modellen finden sich entweder die Temperatur oder der Niederschlag im Juni, damit lässt sich für die alle Baumarten gemeinsam ein starker Einfluss der Witterung im Juni belegen. Trotzdem wurden mit Ausnahme der Winter-Linden, für alle aufgeführten Standorte immer mehrere Monate selektiert, in denen ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Witterungsgeschehen und der Jahrringbildung besteht. Besonders für die Trauben-Eichen des Borsberges (QrsBOR) sind die Temperatur und der Niederschlag in fünf Monaten für den Radialzuwachs bedeutend.

Tabelle 4.5: Ergebnisse für die schrittweise Regression (Faktoren) und statistische Kennziffern der darauf basierenden linearen Gesamtmodelle mit den selektierten Variablen Temperatur und Niederschlag.

Art und Standort	Faktoren	FG	Intercept	Stdf.	Multiples R2	Korrigiertes R2	F-Test	P-Wert
FsyBOR	<u>Niederschlag</u>							
	Mai							
	Juni							
	Juli							
	Vorjahr September							
gesamt		83	0,2306	0,24	0,47	0,44	18,11	0,0000
FsyKEL	<u>Temperatur</u>							
	April							
	Juni							
	<u>Niederschlag</u>							
	Juli							
gesamt		84	1,826447	0,16	0,41	0,39	19,43	0,0000
FsyPRI	<u>Temperatur</u>							
	Vorjahr							
	Oktober							
	<u>Niederschlag</u>							
	Juni							
gesamt		85	0,630826	0,13	0,19	0,17	10,18	0,0001
QrsBOR	<u>Temperatur</u>							
	Vorjahr							
	Oktober							
	<u>Niederschlag</u>							
	Februar							
	März							
	Juni							
	Vorjahr							
	August							
gesamt		82	0,3931305	0,18	0,33	0,28	6,604	0,0000
QruBOR	<u>Temperatur</u>							
	April							
	Juni							
gesamt		85	1,90233	0,18	0,20	0,18	10,75	0,0000
QruSTU	<u>Temperatur</u>							
	Vorjahr Juli							
	<u>Niederschlag</u>							
	Juni							
gesamt		85	1,37785	0,13	0,27	0,26	16,1	0,0000
TcoBOR	<u>Temperatur</u>							
	Juni							
gesamt		86	2,04311	0,33203	0,09	0,08	8,464	0,0046

Die Wasserversorgung spielt auf trockenen Standorten eine größere Rolle für das Wachstum und dementsprechend ergeben sich auch Unterschiede für die linearen Regressionsmodelle mit dem Trockenheitsindex als unabhängige Variable (Tab. 4.6). Erwartungsgemäß konnte so

für alle Baumarten, der Rot-Buche, der Rot-Eiche, der Trauben-Eiche und der Winter-Linde des trockenen Waldstandortes Borsberg (BOR) ein starker linearer Zusammenhang zwischen den Wachstumsmustern und dem scPDSI vom Vorjahres-Juli bis zum aktuellen August berechnet werden.

Abweichend zu den linearen Regressionsmodellen für die Rot-Buche auf Basis der Temperatur und des Niederschlags, konnte nur für die beiden trockenen Waldstandorte (FsyBOR, FsyKEL) ein signifikanter Einfluss des Trockenheitsindex ermittelt werden, nicht jedoch für die frischen-feuchten Waldstandorte. Dagegen limitiert die Wasserversorgung inklusive des Bodenwasserhaushaltes (scPDSI) für die beiden städtischen Einzelbäume der Rot-Buche (FsyWSC, FsyWIE) das Wachstum.

Tabelle 4.6: Signifikante Ergebnisse für die Lineare Regressionsanalyse mit sämtlichen Monatswerten des scPDSI vom Vorjahres-Juli bis zum aktuellen Jahr im August

Art und Standort	FG	Stdf.	Multiples R²	Korrigiertes R²	F-Test	P-Wert
FsyBOR	68	0,23	0,53	0,44	5,54	0,0000
FsyKEL	68	0,18	0,35	0,28	2,62	0,0041
FsyWSC	68	0,26	0,33	0,19	2,36	0,0098
FsyWIE	68	0,30	0,28	0,13	1,86	0,0483
PxhROB	68	0,17	0,31	0,17	2,20	0,0160
PcoFOE	68	0,22	0,31	0,17	2,21	0,0156
QrsBOR	68	0,19	0,34	0,20	2,48	0,0067
QruBOR	68	0,15	0,52	0,42	5,35	0,0000
QruSTU	68	0,13	0,43	0,31	3,67	0,0001
QruZSC	68	0,12	0,37	0,24	2,81	0,0023
TcoBOR	68	0,26	0,52	0,41	5,17	0,0000
TplKRI	68	0,16	0,31	0,17	2,24	0,0145

Auch die Modelle für die beiden urbanen Chronologien der Ahornblättrige Platane (PxhROB) und der Rot-Eiche (QruZSC) weisen den Einfluss von Wasserdefiziten und –überschüssen auf den Zuwachs dieser Bäume nach. Jedoch ist der Anteil der erklärbaren Varianz für die Regressionsmodelle mit der Variable scPDSI für alle Chronologien stets niedriger als mit den beiden Variablen Temperatur und Niederschlag. Zudem erreichen die linearen Modelle der städtischen Chronologien kaum 20% der erklärbaren Varianz und nur für die Rot-Eichen der Stübelallee einen Anteil von 31%.

Der Einfluss des Trockenheitsindex wurde ebenso wie für die Temperatur und den Niederschlag in einer schrittweisen Regression untersucht um die Zeiträume zu bestimmen, in denen ein Haupteinfluss auf die Jahrringbildung besteht (Tab. 4.7).

Tabelle 4.7: Ergebnisse für die schrittweise Regression (Faktoren) und statistische Kennziffern der darauf basierenden linearen Gesamtmodelle mit den selektierten Zeiträumen für den scPDSI.

Art und Standort	Faktoren	FG	Intercept	Std.	Multiples R2	Korrigiertes R2	F-Test	P-Wert
FsyBOR	April Mai							
gesamt		81	0,99906	0,25	0,38	0,36	24,3	0,0000
FsyKEL	Vorjahres Juli Vorjahres September							
gesamt		81	1,01082	0,18	0,22	0,20	11,17	0,0000
FsyWSC	Mai							
gesamt		81	1,00076	0,28	0,08	0,07	6,82	0,0105
PxhROB	Juli							
gesamt		81	1,0046	0,17	0,18	0,17	17,74	0,0000
PcoFOE	Mai							
gesamt		81	0,98631	0,24	0,09	0,07	7,63	0,0071
QrsBOR	Juni							
gesamt		81	0,99562	0,19	0,20	0,19	20,71	0,0000
QruBOR	Vorjahr Oktober Aktuelles Jahr Februar, Juni							
gesamt		79	1,0073	0,16	0,39	0,37	16,91	0,0000
QruSTU	Juni							
gesamt		81	0,9924	0,13	0,25	0,25	27,58	0,0000
QruZSC	Juni							
gesamt		81	0,9954	0,12	0,18	0,17	17,29	0,0000
TcoBOR	Vorjahr Juli, September Aktuelles Jahr Juni							
gesamt		79	1,0335	0,25	0,46	0,44	22,43	0,0000
TplKRI	Juni							
gesamt		81	0,99602	0,16	0,15	0,14	13,94	0,0003

Wenngleich der Anteil der erklärbaren Varianz für die linearen Modelle für die urbanen Chronologien nur bei maximal $R^2= 0,25$ (QruSTU) liegt, können für insgesamt sechs urbane Standorte einzelne Monate bestimmt werden, in denen Wasserdefizite oder –überschüsse für das Zuwachsgeschehen von primäre Bedeutung sind. Für die Waldbäume liefern die Modelle,

für die zumeist mehrere Monate einfließen, einen höheren Erklärungsgehalt als für die urbanen Chronologien. Ebenfalls wie für die Temperatur und den Niederschlag zeigt die Berechnung mit dem scPDSI in der Zeit von Mai bis Juli, am häufigsten aber im Juni die stärksten Zusammenhänge.

Zusammenfassende Betrachtung der klimatischen Zuwachsteuerung

Für die Mehrzahl der untersuchten Baumarten lässt sich deutlich erkennen, dass der Temperatur im Vorjahr in der Periode von Juli bis September und im aktuellen Juni für das Wachstum die größte Bedeutung zukommt. Für die Waldbäume der Rot-Buche (Fsy), der Rot-Eiche (Qru), der Trauben-Eiche (QrsBOR) und der Winter-Linde (Tco) des Standortes Borsberg (BOR) wurde die stärkste Temperaturabhängigkeit ermittelt, mit signifikant negativen Zusammenhängen im gesamten Vorjahreszeitraum von Juli bis September und in der aktuellen Vegetationsperiode in ein bis zwei Monaten aus. Zwischen den Buchenstandorten unterschiedlicher Wasserversorgung ist der Radialzuwachs für die frischenfeuchten Standorte geringer von der Temperatur beeinflusst.

Ein markanter Gegensatz zeichnet sich zwischen den Stadtbäumen der Gattung *Acer* und den Waldbäumen von *Fagus sylvatica* ab. Während die Ahornarten, mit Ausnahme der Spitz-Ahorne auf der Berchtesgadener Straße (ApIBER), allein auf die Temperaturen im Juli des Vorjahres reagieren, konnte für die Buchen sowohl ein starker Vorjahreseinfluss im September als auch im Juni im Jahr der Ringbildung analysiert werden. Hervorzuheben sind auch die nachweisbaren Einflüsse der Temperaturen in den Wintermonaten für acht urbane Chronologien und für zwei Chronologien der Rot-Buche der Bachtälchenstandorte Friedrichsgrund (FRI) und Prießnitzwasserfall, die zumeist positiv korreliert sind. Dadurch wird eine wachstumsfördernde Wirkung von milden Wintertemperaturen auf den nachfolgenden Zuwachs erkennbar, die besonders hoch bei der Ahornblättrigen Platane und der Trauben-Eiche ist. Im Baumartenvergleich weisen die urbanen Sommer-Linden die geringste und die Rot-Buchen des Borsberges die stärkste Temperaturabhängigkeit aller untersuchten Baumarten auf.

Für die Abhängigkeit des Wachstums von den Niederschlagsmengen lassen sich wiederum häufig starke Zusammenhänge im September des Vorjahres und in der laufenden Vegetationsperiode von April bis Juli erkennen. Bis auf drei Ausnahmen (PcoBSH, QruROB, QruSTU) für die Monate Juli sowie August fördern überdurchschnittliche Niederschlagsmengen grundsätzlich hohe Zuwächse. Analog zu den Ergebnissen für die

Temperatur konnte für die Waldbäume des Borsberges eine stärkere Niederschlagssteuerung, mit den stärksten Korrelationen im Juni im Jahr der Ringbildung festgestellt werden als für die entsprechenden Arten auf den städtischen Standorten.

Betrachtet man die Monate, in denen eine Niederschlagswirkung auf den Zuwachs nachgewiesen werden kann, können differenzierte Antworten der Baumarten beschrieben werden. So reagiert der Berg-Ahorn, die Rot-Buche und die Ahornblättrigen Platane häufig noch im Monat Juli des aktuellen Jahres auf hohe Niederschläge, während ein Einfluss auf die Eichenarten im Juli nicht mehr gegeben ist, oder signifikant negative Beziehungen berechnet wurden. Obwohl für die Sommer-Linde insgesamt nur in wenigen Monaten signifikante Zusammenhänge bestehen, sind die Korrelationskoeffizienten in diesen Monaten ähnlich hoch wie die der restlichen Baumarten.

Die Wachstumskurven lassen eine ausgeprägte Abhängigkeit vom scPDSI über längere Zeiträume als die reinen Temperatur- oder der Niederschlagszeitreihen erkennen. Damit lässt sich schlussfolgern, dass sich der Einfluss von der Wasserverfügbarkeit inklusive der approximierten Bodenfeuchte nicht auf einzelne Monate begrenzen lässt, sondern über eine längere Periode eine Wirksamkeit auf die Jahrringbildung entfaltet. Trotzdem beweisen die schrittweisen Regressionsanalysen, dass sich die Wasserverfügbarkeit im Juni häufig stärksten auf den Radialzuwachs auswirkt.

Die Ergebnisse aus den Korrelations- und Regressionsanalysen für den gesamten Zeitraum lassen wiederum eine vergleichsweise stärkere Zeichnung in den Jahrringabfolgen durch den scPDSI für die Bäume des trocken Waldstandortes Borsberg erkennen, für den sich erwartungsgemäß Wasserdefizite besonders stark im Zuwachs widerspiegeln. Dagegen konnte für die frischen-feuchten Buchenstandorte kein, oder nur ein geringer Einfluss von Wasserüberschüssen oder Wassermangel auf den Zuwachs ermittelt werden. Für alle übrigen Buchen-Chronologien konnten stärker Beziehungen zum scPDSI berechnet werden als zu den Temperatur- und Niederschlagswerten.

Die Stadtbaumchronologien reagieren deutlich differenzierter auf den scPDSI als die Waldbäume. So wurden einerseits stärkere Zusammenhänge zwischen den Wachstumsmustern und den scPDSI für stark versiegelte Straßenbaumstandorte (z.B. AplLIL, PxhROB, QruZSC) und für zwei stark versiegelte Einzelbaumstandorte der Rot-Buche (FsyWSC, FsyWIE) gefunden, aber auch keine oder kaum Abhängigkeiten für Standorte geringer Porosität und hoher Versiegelung (z.B. AplSAC, PcoBSH, QrsWSC, QruROB). Im Baumartenvergleich der städtischen Chronologien zeichnen sich die Linden und Ahornarten

durch eine vergleichsweise geringe Beeinflussung durch den scPDSI aus, während die Jahrringmuster der Rot-Eichen und der Ahornblättrigen Platane stark zum scPDSI zeichnen. Der Radialzuwachs der Kultur-Birnen ist im Baumartenvergleich für alle drei Standorte am wenigsten vom Trockenheitsindex determiniert.

4.3.1 Veränderung der Klima-Zuwachs-Relation

Für jede Chronologie wurde die moving correlations im Zeitraum von Juli des Vorjahres bis zum aktuellen August, also über 14 Monate, berechnet. Zunächst soll am Beispiel für die Berg-Ahorne der Sachsenwerkstraße die zeitliche Entwicklung der Klima-Zuwachs-Relation für den Monat Juni im aktuellen Jahr erklärt werden (Abb. 4.21). Der signifikante Niederschlagseinfluss ist dabei über den gesamten Analysezeitraum von 1904 bis 2008 nahezu konstant und oszilliert um einen Korrelationskoeffizienten von 0,35, was auf einen gleichbleibend hohen Einfluss der Niederschlagsmengen im aktuellen Juni deutet. Anders verläuft die Entwicklung der Temperaturabhängigkeit. Hier kann ein stark steigender Einfluss der Temperatur berechnet werden, der sich besonders dramatisch innerhalb von nur 10 Jahren (1915 bis 1975 bis 1925 bis 1985) verstärkt und hier erstmals statistisch nachweisbar mit dem Radialzuwachs korreliert. Auch anschließend ist eine, wenn auch nur leichte, Zunahme des Temperatureinflusses bis zu $R = -0,40$ zu beobachten. Für den Monat Juni hat damit die Temperatur gegenüber den Niederschlägen für den Zuwachs des Berg-Ahorns stark an Bedeutung gewonnen und ist in den letzten drei Dekaden wichtiger als der Niederschlag.

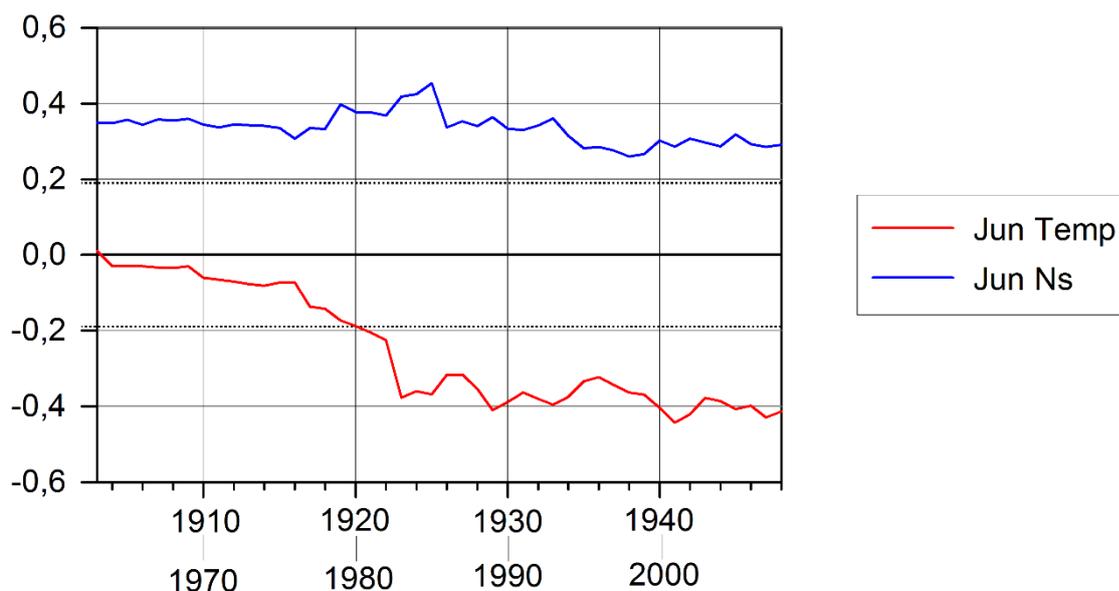


Abbildung 4.21: 'Moving correlations' (Basislänge 60 Jahre) für Berg-Ahorn der Sachsenwerkstraße für Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Linie) im Monat Juni des aktuellen Jahres im Zeitraum 1904 bis 2008. Die gepunktete horizontale Linien markieren die Signifikanzlevel ($P < 0.05$).

In Abbildung 4.22 soll beispielhaft eine sich verringernde klimatische Wirkung erläutert werden. Im Vergleich zum Niederschlag kann für die Temperatur eine Abnahme der Wirkung auf den Radialzuwachs festgestellt werden. So verringert sich der Korrelationskoeffizient von 0,4 zu Beginn des Zeitraums bis zum Intervall 1875 bis 1935 auf 0,2 und sinkt anschließend auf ein Niveau, in dem keine nachweisbaren Einflüsse mehr feststellbar sind. Die Zuwachswirksamkeit des Niederschlags erhöht sich hingegen leicht und erreicht im letzten Drittel des Analysezeitraums knapp signifikante Werte, was auf eine geringe Bedeutung für den Zuwachs im Folgejahr deutet.

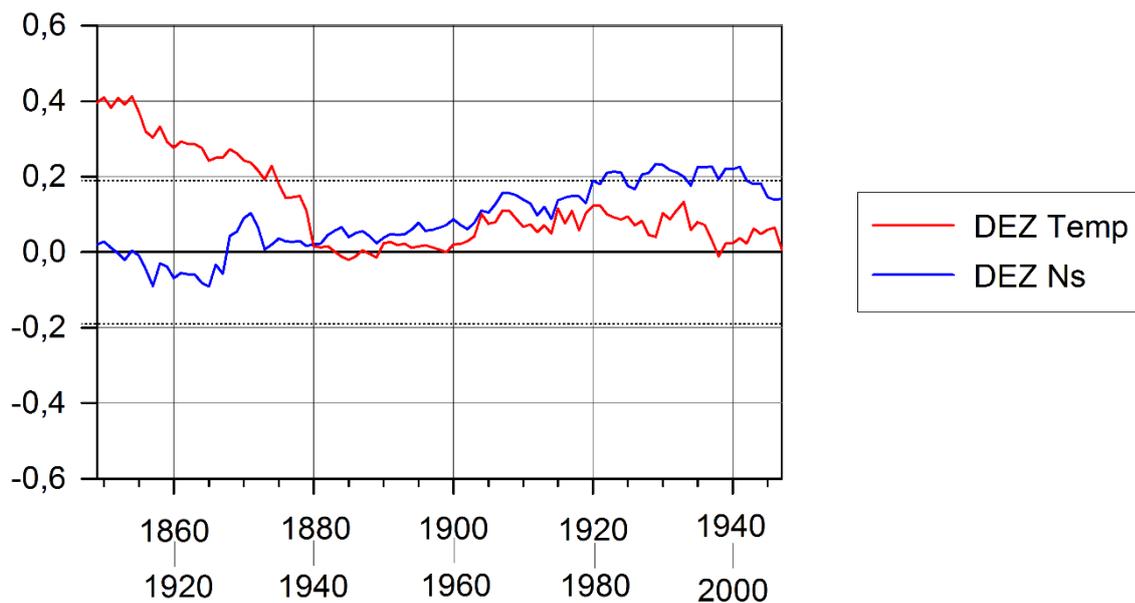


Abbildung 4.22: 'Moving correlations' (Basislänge 60 Jahre) für einen urbanen Einzelbaum der Rot-Buche der Waldschlösschenstraße für Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Linie) im Monat Juni des aktuellen Jahres im Zeitraum 1849 bis 2007. Die gepunktete horizontale Linien markieren die Signifikanzlevel ($P < 0.05$).

In Tabelle 4.8 bis 4.10 sind sämtliche signifikanten Klimaeinflüsse und deren Veränderungen für alle Chronologien zusammengefasst dargestellt. Damit können die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Arten und Standorten besser und schneller erfasst werden als über die Analyse der Einzelgraphiken ([Anhang X](#)).

Für alle Chronologien der **Spitz-Ahorne** zeigen sich übereinstimmend eine Zunahme der Wachstumsabhängigkeit von den Niederschlägen im Monat September des Vorjahres sowie leicht zunehmende Korrelationen im Juni des aktuellen Jahres (Tab. 4.9). Auch die Entwicklung der Temperatur-Zuwachs Relationen lässt einen steigenden Einfluss der Juni Temperaturen auf den Zuwachs erkennen (Tab. 4.8). Eine Veränderung der Korrelation zum scPDSI wurde nur für die Bäume der Lilienthalstraße, mit stark zunehmenden Abhängigkeiten zum scPDSI im gesamten Zeitraum vom Oktober des Vorjahres bis zum August des aktuellen Jahres gefunden.

Für den **Berg-Ahorn** auf der Sachsenwerkstraße konnte eine stark gesteigerte Empfindlichkeit des Radialzuwachses sowohl gegenüber der Juli-Temperatur im Vorjahr als auch gegenüber den Juni-Temperaturen im aktuellen Jahr berechnet werden (Tab 4.8). Damit wurden Korrelationskoeffizienten zu den Temperaturen von unter $-0,40$ am Ende des Analysezeitraums bis zum Jahr 2007 ermittelt. Auch die Niederschläge im Vorjahres-Oktober werden im der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts für den Radialzuwachs immer wichtiger, wohingegen sie im aktuellen Jahr im Mai und Juni eine gleichbleibende, bzw. abnehmende Bedeutung erfahren (Tab 4.9). Für die zeitliche Dynamik zwischen dem Zuwachs und dem scPDSI lässt sich ein besonders starker Anstieg der Korrelation feststellen, die in ihrem Zeitraum und in ihrer Stärke klare Parallelen zum Spitz-Ahorn auf der Lilienthalstraße erkennen lässt.

Für die **Rot-Buchen** kann sowohl für die städtischen als auch für die urbanen Standorte eine deutliche Zunahme der negativen Korrelation zu den Vorjahrestemperaturen im August und September berechnet werden. Im Unterschied zu den urbanen Chronologien belegen die moving intervals für alle Waldstandorte eine stark steigende Bedeutung der April-Temperaturen auf den Zuwachs. Alle Rot-Buchen, mit Ausnahme für die Bäume des feuchten Standortes Friedrichsgrund (FsyFRI), reagieren zunehmend sensitiver auf die Temperaturen im Juni des aktuellen Jahres. Für die beiden frischen bis feuchten Waldstandorte (FsyFRI, FsyPRI) zeigt sich eine steigende Bedeutung der Temperaturen im Oktober des Vorjahres. Allerdings ist der Zuwachs hier positiv mit der Temperatur korreliert. Für den urbanen Einzelbaumstandorte (FsyWIE) und die beiden frischen bis feuchten Waldstandorte (FsyFRI, FsyPRI) konnte ein nahezu konstanter Einfluss der Witterung im Winterung (Dezember bis Februar) festgestellt werden. Einzig die positive Relation zwischen dem Radialzuwachs und der Januar-Temperatur für FsyPRI verringert sich auf ein nicht-signifikantes Niveau bis zum Jahr 2007.

Hinsichtlich der Niederschlagsabhängigkeit zeigt sich für die Rot-Buchen des Borsberges die stärkste Veränderung, mit einer stark zunehmenden Sensitivität gegenüber den Niederschlagsmengen im April des aktuellen Jahres bis zu einem Korrelationskoeffizienten von $0,29$ im letzten Intervall von 1947 bis 2007. Für beide trockenen Waldstandorte kann ein relativ gleichbleibender Niederschlagseinfluss im Vorjahr von August bis September (FsyBOR), bzw. von Juli bis August (FsyKEL) beobachtet werden. Eine weitere Übereinstimmung ergibt sich in der Tendenz der Korrelation zwischen Zuwachs und Niederschlag für den Monat Juni für die beiden Waldstandorte Kellerbrücke (KEL) und

Prießnitz (PRI) sowie für die drei urbanen Einzelbaumstandorte Bosewitzer Straße (FsyBOS), Waldschlösschenstraße (WSC) und Wiener Straße (WIE). Hier wirken sich hohe Niederschlagsmengen im Juni zunehmend wachstumsfördernd aus. Anders ausgedrückt bedeutet dies jedoch auch, dass geringe Niederschläge im Juni ein geringes Wachstum hervorrufen. Trotz der tendenziell abnehmenden Wachstumsabhängigkeit von den Juni-Niederschlägen für den trockenen Waldstandort FsyBOR, bleibt die Witterung dieses Monats für den Radialzuwachs für alle Buchenstandorte damit von primärer Bedeutung.

Betrachtet man die Ergebnisse für die moving intervals zum scPDSI für die Rot-Buchen, so stellt man zunächst weniger Gemeinsamkeiten als für die Temperatur und Niederschlagsanalysen fest. Trotzdem zeigen sich für die Waldbäume übereinstimmend reduzierte oder zumindest gleichbleibend hohe Korrelationen zum scPDSI vom Mai bis August im aktuellen Jahr. Auch für die urbane Chronologie FsyWSC konnte diese Tendenz beobachtet werden. Dagegen übt der scPDSI über die letzten Jahrzehnte für die urbanen Einzelbäume FsyBOS und FsyWIE einen steigenden Einfluss von Mai bis August aus. In dieser Betrachtung müssen natürlich auch die Ergebnisse für die Korrelationsanalysen im Zeitraum 1920 bis 2007 einfließen, für die bisher keine Korrelationen zum scPDSI für FsyBOS ermittelt wurden, wohingegen die Zuwachsabhängigkeit für die übrigen Standorte im gemeinsamen Analysezeitraum bis 2007 bereits vorhanden ist.

Die moving intervals bestätigen die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für die Klimaabhängigkeit des Radialzuwachses der **Ahornblättrigen Platane**. Die negativen Korrelationen zu den Temperaturen von Juli bis September im Vorjahr sind über die Zeit stabil, oder verringern sich für den November des Vorjahres und für den Februar des aktuellen Jahres. Niederschlag und Zuwachs im Vorjahres-September und im Juni des aktuellen Jahres zeigen einen zurückgehenden oder gleichbleibend hohen Zusammenhang im Februar und Juli (Tab. 4.9). Einzig zum scPDSI konnte ein Anstieg der Klimasensitivität des Wachstums in einem Zeitraum von Juli bis September im Vorjahr und im aktuellen April beobachtet werden. Dennoch ist der Einfluss der Wasserverfügbarkeit über die meisten Monate relativ stabil und oder verringert sich sogar, wie beispielsweise für den Juni.

Tabelle 4.8: Ergebnisse für die Moving Intervals für den Temperatureinfluss im Vorjahr und im aktuellen Jahr. Rot markierte Kürzel stehen für negative Korrelationen und grüne für positive Korrelationen. Die Veränderungen wurden immer vom ersten Jahrzehnt des Analysezeitraums bis zum letzten Jahrzehnt verglichen. Eine Erläuterung der Abkürzungen findet sich unterhalb der Tabelle.

Art und Standort	Vorjahr						aktuelles Jahr							
	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
ApIBER	0	+++	+++			0						++		
ApILIL	++											+++		
ApISAC	0											±		
ApsSAC	+++						N--		N--		+++			
FsyBOR	0	++	++						+++	+	++			
FsyFRI		+++	+++	++			+		+++		0			
FsyKEL	N--		+++						++		+			
FsyPRI	++	+++	++	++			N--	0	+++		++			
FsyBOS		+++									+++			
FsyWSC	+++		+++								+++			
FsyWIE											+++		-	
PxhROB	0	0	0		-		--							
PcoBSH	+++	++							0					+++
PcoFOE	+	0	0					+++						+++
PcoNUS	0	+						+				0		++
QrsBOR		++							++	0	0			
QrsWSC							-	0						
QruBOR	0	0	++						+++		0			
QruKKP			+++			N-			++		±			
QruROB	+++	++	++						+++					
QruSTU	0	+++	++			N-	N--	N--			0			
QruZSC	-	+						N-				--		
TcoBOR	++	+++	+++						++		-			
TcoTRO					N-						±			
TplKRI						+++		0				±		
TplPSC	+++	++	0		+++			N--						

+	Zunahme der Korrelation (0,06 < 0,10)	-	Abnahme der Korrelation (0,06 < 0,10)
++	Zunahme der Korrelation (< 0,20)	--	Abnahme der Korrelation (< 0,20)
+++	starke Zunahme der Korrelation (> 0,20)	---	starke Abnahme der Korrelation (> 0,20)
0	keine Veränderung (-0,05 ≤ 0 ≤ 0,05)	N	Entwicklung zu nicht signifikanten Einfluss
<u>Unterstrichen</u>	sign. Einfluss der für die Gesamtanalyse der Chronologie nicht besteht		

Für die Klima-Zuwachs-Analyse (vgl. Abb. 4.16) der **Kultur-Birne** auf der Nussallee (PcoNUS) wurden positive Korrelationen zu den Sommertemperaturen im aktuellen Jahr gefunden, die sich über die moving correlations nun auch für die Chronologien der Bernard-Shaw-Straße (PcoBSH) sowie auf der Försterlingstraße (PcoFOE) zeigen. Für den Niederschlageinfluss ergibt sich ein differenzierteres Bild. Während die Kultur-Birnen auf der

Bernard-Shaw-Straße (PcoBSH) über die Zeit schwächere Zusammenhänge zwischen den Niederschlagsmengen im September des Vorjahres erkennen lassen, entwickeln die Bäume der Försterlingstraße im gleichen Monat eine stärkere Niederschlagsabhängigkeit. Die gleitenden Korrelationen zum scPDSI ergeben nur für die Birnbäume der Försterlingstraße signifikante Veränderungen, die im Januar und April auf steigende und für den Mai und Juni auf rückgängige Abhängigkeiten der Wachstumsmuster vom scPDSI hinweisen.

Auch für die **Trauben-Eichen** konnten nur in wenigen Monaten Veränderungen in der Temperaturabhängigkeit des Radialzuwachses ermittelt werden. Der Einfluss der Wintertemperaturen im Januar für die städtischen Trauben-Eichen (QrsWSC) verringert sich so, dass Effekte der Januartemperatur in den letzten Jahrzehnten statistisch nicht mehr nachweisbar sind (Tab. 4.8). Für den Waldstandort verstärkt sich die Wachstumssteuerung durch die Temperatur im Vorjahres-August und im aktuellen April.

Der Zuwachs der Trauben-Eichen des Waldstandortes (QrsBOR) korreliert zunehmend zu den Niederschlagsmengen von August bis Oktober des Vorjahres sowie im April des aktuellen Jahres. Dagegen verringert sich die Korrelation zu den Niederschlägen im aktuellen Juli. Dagegen verändert sich die Niederschlagssensitivität der urbanen Trauben-Eichen kaum. Die moving intervals zeigen, dass sich der geringe Einfluss des scPDSI für die urbane Chronologie im Zeitraum von 1920 bis 2007 in den Monaten Juli und August, in den letzten vier Dekaden vollständig verliert. Dagegen wurden engere Zusammenhänge zwischen dem Wachstum und den scPDSI für die Waldbäume, mit einer besonders ansteigenden Bedeutung der Wasserverfügbarkeit im Monat April analysiert.

Ähnlich wie für den Waldstandort der Trauben-Eichen, intensiviert sich die Abhängigkeit der Zuwachswerte von den Vorjahrestemperaturen im August oder September für alle Chronologien der **Rot-Eichen**. Diese Relation entwickelt sich für die Mehrzahl der gefundenen Zusammenhänge erst in den letzten Dekaden zu signifikanten Einflüssen, was darauf verweist, dass die Bäume mit zunehmendem Alter stärker auf die Temperatur reagieren. Bis auf zwei Chronologien (QruSTU, QruZSC) wurde für alle Rot-Eichen-Chronologien ein sehr starker Anstieg der klimatischen Bindung zu den Apriltemperaturen im aktuellen Jahr gefunden. Dies lässt sich mit Veränderungen der Korrelationskoeffizienten $> 0,15$ belegen. Für zwei Standorte (QruSTU, QruZSC) wurde zudem ein rückläufiger Einfluss der Wintertemperaturen entdeckt.

Tabelle 4.9: Ergebnisse für die Moving Intervals für den Niederschlagseinfluss im Vorjahr und im aktuellen Jahr. Rot markierte Kürzel stehen für negative Korrelationen und grüne für positive Korrelationen. Die Veränderungen wurden immer vom ersten Jahrzehnt des Analysezeitraums bis zum letzten Jahrzehnt verglichen. Eine Erläuterung der Abkürzungen findet sich unterhalb der Tabelle.

Art und Standort	Vorjahr						aktuelles Jahr							
	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
ApIBER			++							S+		++	-	
ApILIL			+++								±	+		
ApISAC			+		0							+		
ApsSAC				+++							0	-	0	
FsyBOR	N--	±	0							+++	--	--	0	
FsyFRI								++				0		
FsyKEL	0	0	++							-	---	++	+	
FsyPRI												+	++	
FsyBOS		+++										+++	0	
FsyWSC			0								N--	++	++	
FsyWIE								0			+	0	0	
PxhROB			--					0				N--	0	
PcoBSH				--						±				0
PcoFOE	0			++		0				0		--		N--
PcoNUS							0							
QrsBOR		+	+++	+++						++	0	-		
QrsWSC											+			
QruBOR		±	0	0						+++	0	-		N--
QruKKP						0	N--					+++		
QruROB			±	++	±					+++		--		
QruSTU		0	0			0		0			+++	+		0
QruZSC						++					0	-		
TcoBOR	0		+++	0						±	---	--	++	
TcoTRO	0													
TpIKRI			+			0					N---	+++		
TpIPSC			+						N-			±		±

+	Zunahme der Korrelation (0,06 < 0,10)	-	Abnahme der Korrelation (0,06 < 0,10)
++	Zunahme der Korrelation (< 0,20)	--	Abnahme der Korrelation (< 0,20)
+++	starke Zunahme der Korrelation (> 0,20)	---	starke Abnahme der Korrelation (> 0,20)
0	keine Veränderung (-0,05 ≤ 0 ≤ 0,05)	N	Entwicklung zu nicht signifikanten Einfluss
<u>Unterstrichen</u>	sign. Einfluss der für die Gesamtanalyse der Chronologie nicht besteht		

Bis auf eine Ausnahme für die Robert-Berndt-Straße (QruROB) bleibt der Niederschlagseinfluss im Vorjahr für die Rot-Eichen über die Zeit weitestgehend stabil. Genauso wie für die Temperatur, verstärkt sich die Wachstumssteuerung von QruBOR und QruROB durch die April-Niederschläge. Die zeitliche Dynamik der Korrelation zum scPDSI lässt deutliche Parallelen zwischen den beiden urbanen Standorten QruKKP und QruSTU

sowie zwischen den Waldbäumen von QruBOR und den Stadtbäumen von QruZSC erkennen. Während jedoch die erstgenannte Gruppe in allen Monaten stark steigenden Korrelationen bis zu $r > 0,20$ erkennen lässt, so erbrachten die Berechnung für die zweite Gruppe gleichbleibende oder zurückgehende Zusammenhänge.

Für die **Winter-Linde** auf dem Waldstandort (TcoBOR) intensiviert sich die negative Korrelation zu den Vorjahrestemperaturen im Juli, August, September und im aktuellen Jahr im April. Demgegenüber wurde für die Niederschlagssensitivität nur eine starke Steigerung im September des Vorjahres gefunden. Besonders in der aktuellen Vegetationsperiode von Mai bis Juni sinkt die Bedeutung der Niederschläge für das Wachstum der Winter-Linde auf dem Trockenstandort.

Während jedoch für die Waldbäume über die letzten Jahrzehnte eine sinkende Bedeutung des scPDSI von Mai bis August im aktuellen Jahr berechnet wurde, korreliert des scPDSI in der gesamten Periode von Vorjahres-Juli bis zum April im aktuellen Jahre kontinuierlich stärker. Über die letzte Dekade des moving intervals liegen die Korrelationskoeffizienten damit durchschnittlich immer über 0,50 für alle Monate von September des Vorjahres bis zum Juni im aktuellen Jahr. Dieser starke Zusammenhang lässt auf die sehr starke Bedeutung der Wasserverhältnisse für die Winter-Linde des Waldstandortes schließen.

Auf dem urbanen Standort (TcoTRO) wurde keine nennenswerte Veränderung in der Wachstumsabhängigkeit zur Temperatur und dem Niederschlag berechnet. Die schwach ausgeprägte Abhängigkeit zum scPDSI vom Juli bis September des Vorjahres zeigt zunehmend schwächere Zusammenhänge.

Auch für beiden Standorte der **Sommer-Linde** ergeben sich über die Berechnung von moving correlations keine eindeutigen und zum Teil konträre Tendenzen. So ergeben sich für die Chronologie der Peter-Schmoll-Straße zunehmende, für die Chronologie der Krippener gleichbleibende Korrelationen zur Temperatur vom Juli bis August des Vorjahres. Jedoch reagieren die Sommer-Linden auf beiden Standorten gemeinsam mit einer ansteigenden Sensitivität gegenüber den Niederschlägen im Vorjahres-September und im Juni des aktuellen Jahres.

Im Vergleich mit allen anderen Baumarten und Standorten konnte allein für die Sommer-Linden auf der Krippener Straße für alle Monate vom Vorjahres-September bis zum August des aktuellen Jahres eine sehr starker Rückgang der Korrelation zum scPDSI beobachtet werden, so dass im letzten Jahrzehnt kein Einfluss mehr nachweisbar ist. Auch auf dem zweiten Standort der Sommer-Linden, der Peter-Schmoll-Straße verringert sich die

Korrelation im Vorjahres-August auf ein nicht-signifikantes Niveau. Dennoch bleiben die geringen, signifikanten Zusammenhänge vom Oktober des Vorjahres bis zum Januar weitestgehend für die Peter-Schmoll-Straße stabil.

Tabelle 4.10: Ergebnisse für die Moving Intervals für den scPDSI vom Vorjahr bis August im zum aktuellen Jahr. Grün Kürzel stehen für positive Korrelationen. Die Veränderungen wurden immer vom ersten Jahrzehnt des Analysezeitraums bis zum letzten Jahrzehnt verglichen. Eine Erläuterung der Abkürzungen findet sich unterhalb der Tabelle.

Art und Standort	Vorjahr						aktuelles Jahr							
	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
AplBER													+	0
AplLIL				+	++	++	++	+++	++	++	+++	+++	+++	+++
AplSAC														
ApsSAC				±	±	++	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	++
FsyBOR	++	+	+	0	0	0	0	+	+	++	0	-	---	--
FsyFRI													N--	N--
FsyKEL					--	--	-	N-	N-	0	--	--	0	0
FsyPRI			0	0	+	+	+	+	±	±	0	0	0	0
FsyBOS			++	++					++	±	++	±	±	±
FsyWSC	++	+	+	++	++	++	++	++	+	++	--	--	--	--
FsyWIE									++	+++	+++	+++	+++	+++
PxhROB	++	+	+	0	0	0	0	0	0	+	-	--	0	-
PcoBSH														
PcoFOE							++			±	-	-		
PcoNUS														
QrsBOR			0	+	+	0	0	+	0	++	+	0	0	0
QrsWSC													N--	N--
QruBOR			--	==	--	--	--	-	-	0	0	0	--	==
QruKKP			++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
QruROB														
QruSTU			+++	+++	++		++	++	+++	+++	+++	+++	++	+++
QruZSC							0	0	-	-	-	0	-	-
TcoBOR	+++	+++	+++	+++	+++	++	++	+++	++	++	--	--	--	--
TcoTRO	-	--	--											
TplKRI			N---	N---	N---	N---	N---	N---	N---	N---	N---	N---	N---	N---
TplPSC		N--	--	0	+	+	0							

+	Zunahme der Korrelation (0,06 < 0,10)	-	Abnahme der Korrelation (0,06 < 0,10)
++	Zunahme der Korrelation (< 0,20)	--	Abnahme der Korrelation (< 0,20)
+++	starke Zunahme der Korrelation (> 0,20)	---	starke Abnahme der Korrelation (> 0,20)
0	keine Veränderung (-0,05 ≤ 0 ≤ 0,05)	N	Entwicklung zu nicht signifikanten Einfluss

Unterstrichen sign. Einfluss der für die Gesamtanalyse der Chronologie nicht besteht

4.3.2 Einzeljehranalysen

Weiserjahranalyse

In Tabelle 4.11 sind alle Weiserjahre aufgeföhrt, die anhand der Dichtefunktionen der Normalverteilungen ermittelt wurden. Dabei kann grundsätzlicly nach den positiven und negativen Weiserjahren unterschieden werden, für die wiederum eine Unterteilung nach schwachen, starken und extremen Weiserjahren zu finden ist.

Tabelle 4.11: Artspezifische Anzahl von Weiserjahren für die gemeinsamen Periode 1920 bis 2007 (Chronologien > 70 Jahre) sowie für 1955 bis 2007 (Chronologien < 70 Jahre, mit # gekennzeichnet). Die Weiserjahre wurden nach „schwach“, „stark“ sowie „extrem“ unterteilt.

Art und Standort	Positive Weiserjahre				Negative Weiserjahre				gesamt
	schwach	stark	extrem	gesamt	schwach	stark	extrem	gesamt	
AplBER #	5	2	1	8	3	2	3	8	16
AplLIL	5	3	4	12	4	6	4	14	26
AplSAC	1	5	3	9	7	4	3	14	23
ApsSAC	3	4	4	11	7	3	5	15	26
FsyBOR	4	5	6	15	4	8	4	16	31
FsyFRI	7	2	2	11	2	4	6	12	23
FsyKEL	7	3	2	12	2	4	3	9	21
FsyPRI	7	3	3	13	7	6	4	17	30
FsyBOS #	1	0	4	5	1	2	4	7	12
FsyWSC	2	3	2	7	6	4	3	13	20
FsyWIE	2	1	1	4	5	2	1	8	12
PxhROB	2	2	8	12	7	4	2	13	25
PcoBSH #	2	3	1	6	2	1	3	6	12
PcoFOE	4	2	5	11	10	4	3	17	28
PcoNUS #	7	3	1	11	6	5	0	11	22
QrsBOR	2	2	8	12	7	4	2	13	25
QrsWSC	7	1	4	12	3	3	4	10	22
QruBOR	4	0	8	12	5	6	3	14	26
QruKKP	3	3	6	12	5	4	3	12	24
QruROB #	4	1	0	5	2	1	3	6	11
QruSTU	3	4	5	12	5	4	3	12	24
QruZSC	5	3	7	15	5	6	1	12	27
TcoBOR	4	4	5	13	5	3	3	11	24
TcoTRO	0	4	6	10	2	6	4	12	22
TplKRI	6	3	3	12	7	6	2	15	27
TplPSC	4	1	7	12	4	3	2	9	21

Im Artvergleich von Wald- zu Stadtstandorten zeigt sich eine Häufung von Wachstumsanomalien für die Rot-Buchen, die Trauben-Eichen und die Winter-Linden des trockenen Waldstandortes (Borsberg, BOR). Die Rot-Buchen dieses Standortes (FsyBOR) und des frischen Waldstandortes Prießnitz (FsyPRI) lassen im Zeitraum von 1920 bis 2007 mit insgesamt 31 bzw. 30 die höchste Anzahl über- bzw. unterdurchschnittlicher Radialzuwächse erkennen. Dagegen zeichnen sich die Einzelbäume der Rot-Buchen auf der Wiener Straße mit insgesamt nur zwölf Weiserjahren (FsyWIE), für die

Waldschlösschenstraße mit 20 Weiserjahren (FsyWSC) und die Rot-Buchen des Waldstandortes Kellerbrücke (FsyKEL) mit 21 Jahren durch die geringste Anzahl der Weiserjahren seit dem Jahr 1920 aus. Für die fünf Chronologien die im Zeitraum 1955 bis 2007 untersucht wurden, finden sich erwartungsgemäß die wenigsten Weiserjahre. Eine Ausnahme bilden die Kultur-Birnen auf der Nussallee (PcoNUS), die in 52 Jahren bis 2007 eine Anzahl von 22 Weiserjahren zeigen und damit alle zwei bis drei Jahre mit einem unter- oder überdurchschnittliches Radialwachstum reagieren.

Auch im Verhältnis von positiven zu negativen Weiserjahren streuen die Ergebnisse für die Rot-Buchen-Chronologien sehr stark standortsabhängig. Während die Relation für die Waldbäumen der Kellerbrücke (FsyKEL) mit $4/3$ zugunsten der positiven Weiserjahre tendiert, liegt das Verhältnis für die beiden städtischen Einzelbäume (FsyWIE = $1/4$; FsyWSC = $7/13$) stark auf Seite der negativen Weiserjahre. Bei der Gegenüberstellung von negativen zu positiven Weiserjahren für die Stadtbäume zeigen der Spitz- und Berg-Ahorn auf der Sachsenwerkstraße, die Kultur-Birnen auf der Försterlingstraße und die Rot-Buchen auf der Waldschlösschenstraße und Wiener Straße mehrheitlich negative Weiserjahre und die Rot-Eichen auf der Zschierener, die Sommer-Linden auf der Peter-Schmoll-Straße sowie die Spitz-Ahorne auf der Berchtesgadener Straße vorrangig positive Weiserjahre.

Die Anzahl der extrem negativen Weiserjahre ist wiederum auf zwei Buchenstandorten (FsyBOS, FsyFRI) und für den Berg-Ahorn auf der Sachsenwerkstraße (ApsSAC) am höchsten. Dagegen wurden für die Kultur-Birnen (PcoFOE) nur drei extrem negative Weiserjahre, aber zehn schwach negative Weiserjahre ermittelt. Die höchste Anzahl von extrem positiven Wachstumsabweichungen wurde für die Ahornblättrige Platane (PxxROB), Trauben-Eichen (QrsBOR) und die Rot-Eichen des Borsberges (QruBOR) mit jeweils acht Jahren im Zeitraum von 1920 bis 2007 berechnet.

Im Folgenden wird versucht, die Ursachen für das Auftreten der **negativen Weiserjahren** zu finden. Dazu wurden die Residuen der Standardabweichung der Parameter Temperatur und Niederschlag im Zeitraum 1920 bis 2007 gebildet und dem durchschnittlichen Klimaverlauf gegenübergestellt. Als Vergleichsgrundlage dienen die berechneten Weiserjahre in Tabelle 4.12. Darin wird deutlich wird, dass sich kein negatives Weiserjahr findet, das auf allen Standorten für alle Arten durchgehend vertreten ist. Im Zeitfenster 1920 bis 2007 werden aber einige Jahre mit einer besonders hohen Anzahl gemeinsam reagierenden Chronologien sichtbar.

Unter diesen Jahren korrespondieren die geringen Zuwächse 1934, 1964, 1976, 2000 sowie 2003 häufig mit überdurchschnittlichen Temperaturen und unterdurchschnittlichen Niederschlägen von März bis Juli in der laufenden Vegetationsperiode (Abb. 4.23). Weiterhin ist die Witterung von Juli bis September im Vorjahr der Jahre 1976 (1975), 1993 (1992), 2000 (1999) als zu trocken und zu warm zu werten.

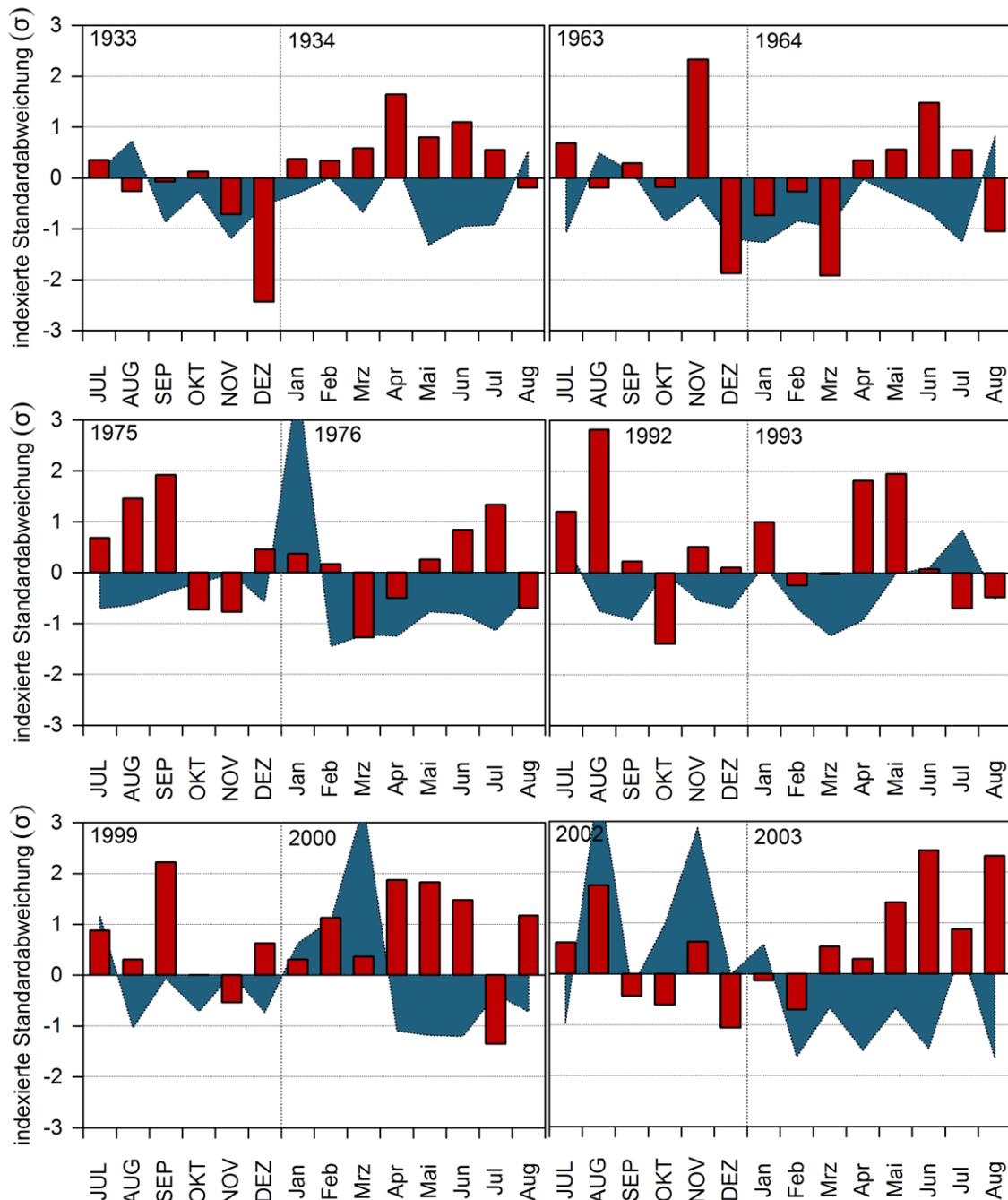


Abbildung 4.23: Witterungsverlauf in den sechs negativen Weiserjahren vom Juli des Vorjahres bis August des aktuellen Jahres, die übereinstimmend am häufigsten bei allen Chronologien gemeinsam vorkommen. Rote Balken = Residuen der Temperatur, Blaue Flächen = Residuen des Niederschlags.

Eine Ausnahme wurde für das Jahr 1993 festgestellt. Hier waren einzig die Temperaturen im April und Mai in der Vegetationsperiode stark überdurchschnittlich und die Niederschläge

von Februar bis Mai unterdurchschnittlich. Dagegen entspricht die Witterung im Juni weitgehend dem langjährigen Mittel.

Nur die Eichenarten, die Ahornblättrige Platane und die Kultur-Birnen reagieren im Jahr 1993 mit einem negativen Weiserjahr (vgl. Tab 4.12). Dagegen zeigen die Ahorne und die Rot-Buchen keine unterdurchschnittlichen Zuwachsrückgänge. Eine Ausnahme hiervon wurde für die Rot-Buchen des Waldstandortes Borsberg festgestellt, die wie alle untersuchten Baumarten dieser Fläche im Jahr 1993 ein negatives Weiserjahr bildeten. Für die Jahre 1934 (17 Chronologien), 1964 (20 Chronologien) und 1976 (20 Chronologien) wurde die höchste Anzahl gemeinsam berechneter Weiserjahre berechnet. Für die Jahre 1934 und 1964 könnten die stark unterdurchschnittlichen Temperaturen im Dezember des Vorjahres, bzw. für 1964 zusätzlich im März, die Jahrringbildung negativ beeinflusst haben. Für das Jahr 2000 sowie 2003 reagieren die Spitz- und Berg-Ahorne sowie die Rot-Buchen häufig mit stark negativen oder extrem negativen Weiserjahren. Obwohl der Witterungsverlauf (Abb. 4.23) von April bis Juli im Jahr 2000 sowie im Jahr 2003 für das Wachstum eindeutig ungünstige Wachstumsbedingungen aufwies, zeigt die Mehrheit der Chronologien der Eichenarten keine und die Winter-Linden erst im Jahr 2004 unterdurchschnittlichen Zuwächse. Auch der Radialzuwachs der Kultur-Birnen und der Ahornblättrige Platane im Jahr 2003 ist durchschnittlich.

Im Jahr 1954 antworten immerhin acht Chronologien mit einem geringen Jahreszuwachs in Form eines negativen Weiserjahres, nicht jedoch die Rot-Buchen, die Trauben-Eichen und die der Ahornblättrige Platane. Betrachtet man den Witterungsverlauf des Jahres 1954, so fallen der kalte Januar und Februar, der sich anschließende etwas überdurchschnittlich warme März und der wiederum kalte und niederschlagsreiche April auf (Abb. 4.24).

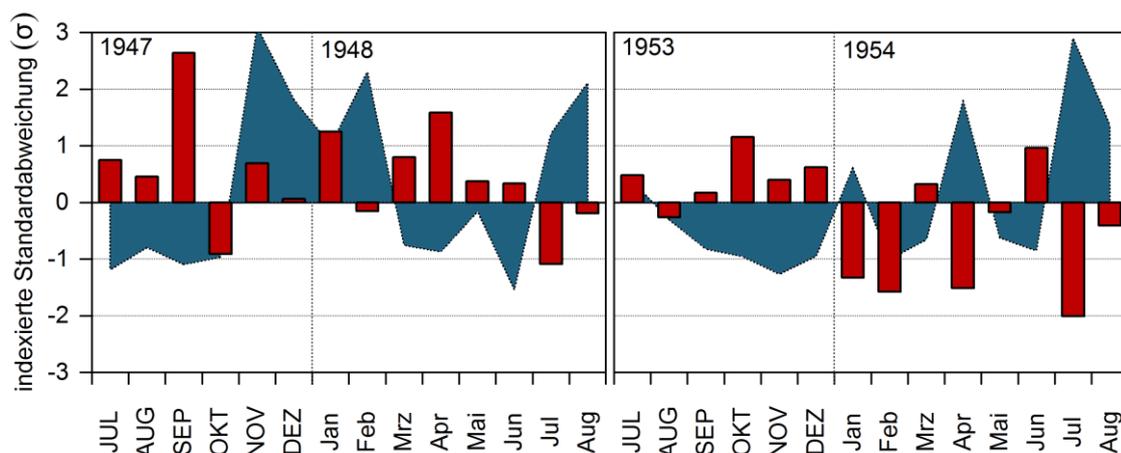


Abbildung 4.24: Witterungsverlauf in den Jahren 1948 und 1954 vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres. Rote Balken = Residuen der Temperatur, Blaue Flächen = Residuen des Niederschlags.

Hier könnte die Ursache für die geringen Zuwächse in den bereits im Blattaustrieb befindlichen Ahornen, Birnen und Linden liegen. Die klimatischen Daten ergaben jedoch keinen Tag mit einer Tagesminimumtemperatur unter -1°C nach dem 1. April, so dass zwar extreme Spätfrostereignisse, nicht aber einzelne tiefe Nachtfröste ausgeschlossen werden können. In den Jahren 1947 und 1948 sind besonders die Witterungsbedingungen in der Vegetationsperiode von März bis Juni als zu trocken und zu warm zu werten (Abb. 4.24), was im Zusammenhang mit den mehrheitlich stark bis extrem unterdurchschnittliche Zuwachsreaktionen für alle Waldbäume der Rot-Buchen, Trauben-Eichen, Rot-Eichen, Winter-Linden, aber auch für die Platanen auf dem Stadtstandort gesehen werden kann. Im Gegensatz dazu reagieren die Ahornarten und urbanen Rot-Buchen mit einem durchschnittlichen Radialzuwachs.

In den beiden Jahren 1983 sowie 1992 konnten nur für die Rot-Buchen und die Ahorne negative Weiserjahre berechnet werden (Abb. 4.26).

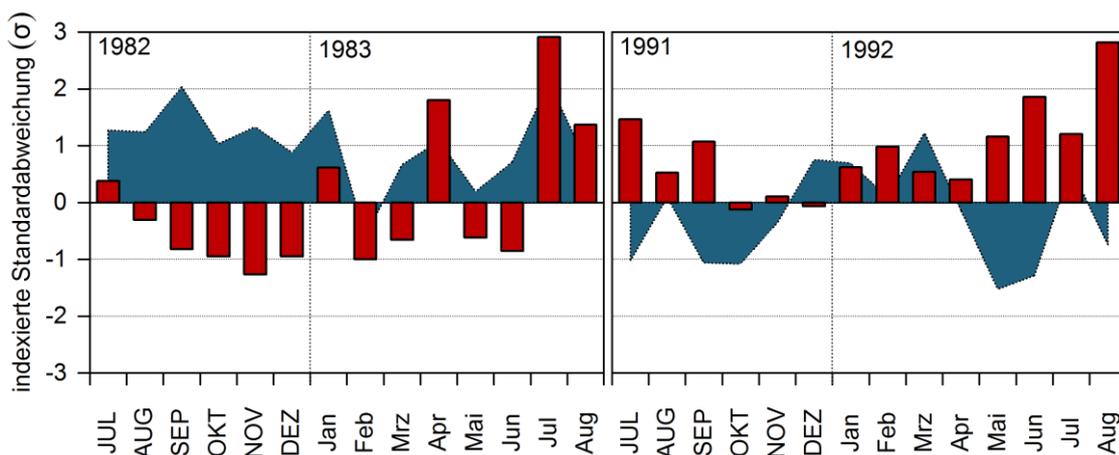


Abbildung 4.25 Witterungsverlauf in den Weiserjahren 1983 und 1992 vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres. Rote Balken = Residuen der Temperatur, Blaue Flächen = Residuen des Niederschlags.

Der Unterschied in der Witterung im Jahr 1983 zum durchschnittlichen Klima in der Periode 1920 bis 2007 besteht lediglich in den hohen Temperaturen im April und Juli (Abb. 4.25, links). Der Niederschlag ist in der gesamten Vegetationsperiode eher überdurchschnittlich. Dagegen kann der geringe Zuwachs im Jahr 1992 mit den unterdurchschnittlichen Regenmengen von April bis August und den überdurchschnittlichen Temperaturen während des gesamten Jahres sowie im Sommer und Herbst des Vorjahres in Verbindung gebracht werden (Abb. 4.25, rechts).

Um mögliche Auswirkungen von Spätfrost zu berücksichtigen, wurden in der Arbeit alle Tagesminimumtemperaturen unter 0°C nach dem 15.04.1920 bis zum Jahr 2007 der Klimastationen Radebeul-Wahnsdorf (246 m. ü. NN) und Dresden-Klotzsche (220 m. ü. NN)

berücksichtigt (Anhang S. 87). Mögliche Zusammenhänge zwischen einem geringen Zuwachs und Spätfrösten lassen sich für die Jahre 1929, 1955, 1956, 1973, 1976, 1978, 1984, 1985 sowie 1986 ableiten. Für die Jahre 1973, 1976, 1984 herrschten zudem trockene und heiße Witterungsbedingungen in der Vegetationsperiode. Im Februar des Jahres 1929 wurden Tiefsttemperaturen bis $-30,5\text{ °C}$ aufgezeichnet, was neben den Spätfrösten eine zusätzliche Erklärung für die unterdurchschnittlichen Radialzuwächse von sieben Chronologien liefern kann. Abgesehen vom Jahr 1929 lässt sich der geringe Zuwachs des Jahres 1978 noch am ehesten mit Spätfrostereignissen in Verbindung bringen. Noch am 11.05.1978 wurden Tiefsttemperaturen von $-3,4\text{ °C}$ ermittelt.

Tabelle 4.13 gibt Auskunft über mögliche Auswirkungen von forstlichen Eingriffen, Baumpflegemaßnahmen und Bauarbeiten auf das Baumwachstum. So ist das negative schwache bis starke Weiserjahr 2007 der Ahorne mit großer Sicherheit auf die leichten Schnittmaßnahmen in den Kronen der Bäume in den Jahren 2006/2007 zurückzuführen.

Tabelle 4.13: Forstliche Eingriffe, Baumpflegemaßnahmen und Bauarbeiten mit Jahresangabe bis zum Jahr 2007

	Bauarbeiten	Baumpflege	Forstliche Eingriffe
AplBER	Keine in den letzten 10 Jahren	2007 teilweise Schnitt	
AplLIL	2006 teilweise Gehwegsanierung	2006 teilweise Schnitt	
AplSAC	Keine in den letzten 10 Jahren	2006 teilweise Schnitt	
ApsSAC	Keine in den letzten 10 Jahren	2006 teilweise Schnitt	
FsyBOR			Wegesicherung
FsyFRI			Einzelbaumentnahmen
FsyKEL			Auflichtungen 1967
FsyPRI			Wegesicherung
FsyBOS	Überschüttung am Stammfuß 2003		
FsyWSC			
FsyWIE			
PxhROB	2007 teilweise Gehwegsanierung		
PcoBSH	Keine in den letzten 10 Jahren	2006 teilweise Schnitt	
PcoFOE			
QrsBOR			Wegesicherung
QrsWSC	2006 Kroneneinkürzungen		
QruBOR			Wegesicherung
QruKKP			
QruROB	2007 teilweise Gehwegsanierung		
QruSTU			
QruZSC	Keine in den letzten 10 Jahren		
TcoBOR			Wegesicherung
TcoTRO	2005 Gehwegsanierung	Ab 2006 jährliche Kroneneinkürzungen und Fällungen	
TplKRI	2004 kleinere Gehwegsanierung	2006 teilweise Schnitt	
TplPSC	Keine in den letzten 10 Jahren		

Auch die schwachen bis stark negativen Weiserjahre 2006/2007 für die Kultur-Birnen auf der Bernhard-Shaw-Straße und für die Winter-Linden der Tronitzer Straße können als Wachstumsantwort auf die Kroneneinkürzungen gesehen werden. Für die Lilienthalstraße (LIL) können sich die Gehwegsanierungen im Jahr 2006 zusätzlich beeinträchtigend auf den Radialzuwachs ausgewirkt haben. Die Abfolge negativer Weiserjahre für den Einzelbaum der Rot-Buche auf der Bosenwitzer Straße ab dem Jahr 2003 bis 2006 liegt mit großer Sicherheit an der Übersättigung des Stammfußes, die letztendlich zum Absterben des Baumes führte. Eine weitere markante Abfolge negativer Weiserjahre ab dem Jahr 1955 für die Rot-Eichen der Robert-Berndt-Straße (Tab. 13, QruROB) lässt sich als Folge des Pflanzschockes und der Etablierung der Bäume interpretieren. Ähnliche Reihen negativer Weiserjahre finden sich für die Stadtbäume der Rot-Eichen der Standorte Käthe-Kollwitz-Platz (QruKKP) ab 1949 sowie auf der Zschierener Straße (QruZSC) ab 1942. Über die möglichen Ursachen ist hier nichts bekannt.

Um einen besseren Vergleich der Reaktionsschemata auf außergewöhnliche Abweichungen von der durchschnittlichen Witterung zu gewährleisten, wurde nach bestimmten Mustern der Witterung gesucht, die eine artspezifische Ausbildung von Weiserjahren erkennen lassen. Die folgende Übersicht gibt die möglichen Ursachen für die Bildung von negativen Weiserjahren wieder.

- 1. Niederschlagsdefizite (mind. ein Monat $\sigma < -1$) und hohe Temperaturen (mind. ein Monat $\sigma > 1$) im gesamten Zeitraum März bis Juli: Grundsätzlich alle Baumarten**
 - 1.1** Niederschlagsdefizite von März bis Juli und/oder überdurchschnittlich hohe Temperaturen von März bis Juli mit einer besonderen Bedeutung im Juni und/oder Juli (mind. ein Monat Temp. $\sigma > 1$) Bsp. 1976, 2000, 2003: Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn, Rot-Buchen, Sommer-Linde
 - 1.2** Durchschnittliche bis leicht unterdurchschnittliche Niederschläge von März bis Juli, aber extrem überdurchschnittlich hohe Temperaturen ($\sigma > 2$) von März bis Juli in einzelnen Monaten Bsp. 1983, 1992: Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn, Rot-Buchen (schwache Weiserjahre)
 - 1.3** Hohe Bedeutung von Niederschlagsdefizite ($\sigma < -1$) und/oder hohen Temp. ($\sigma > +1,5$) im April/Mai Bsp. 1934, 1993: Kultur-Birne, Platane, Trauben-Eiche, Rot-Eiche, Rot-Buchen (trockene Flächen)
- 2. Spätfrost (nach 10.04) Bsp. 1929, 1973, 1978: Rot-Buche, Platane, Kultur-Birne.**

In den sechs Jahren 1926, 1939, 1958, 1969, 1988 und 2001 konnte eine Häufung von überdurchschnittlichen Zuwächsen in Form von **positiven Weiserjahren**, gemäß der hier verwendeten Definition ($\sigma > 1$) berechnet werden (Tab. 4.12). In diesen Jahren liegen die Temperaturen im Juni mit Ausnahme für das Jahr 1939 stets unter dem langjährigen Mittel von 1920 bis 2007.

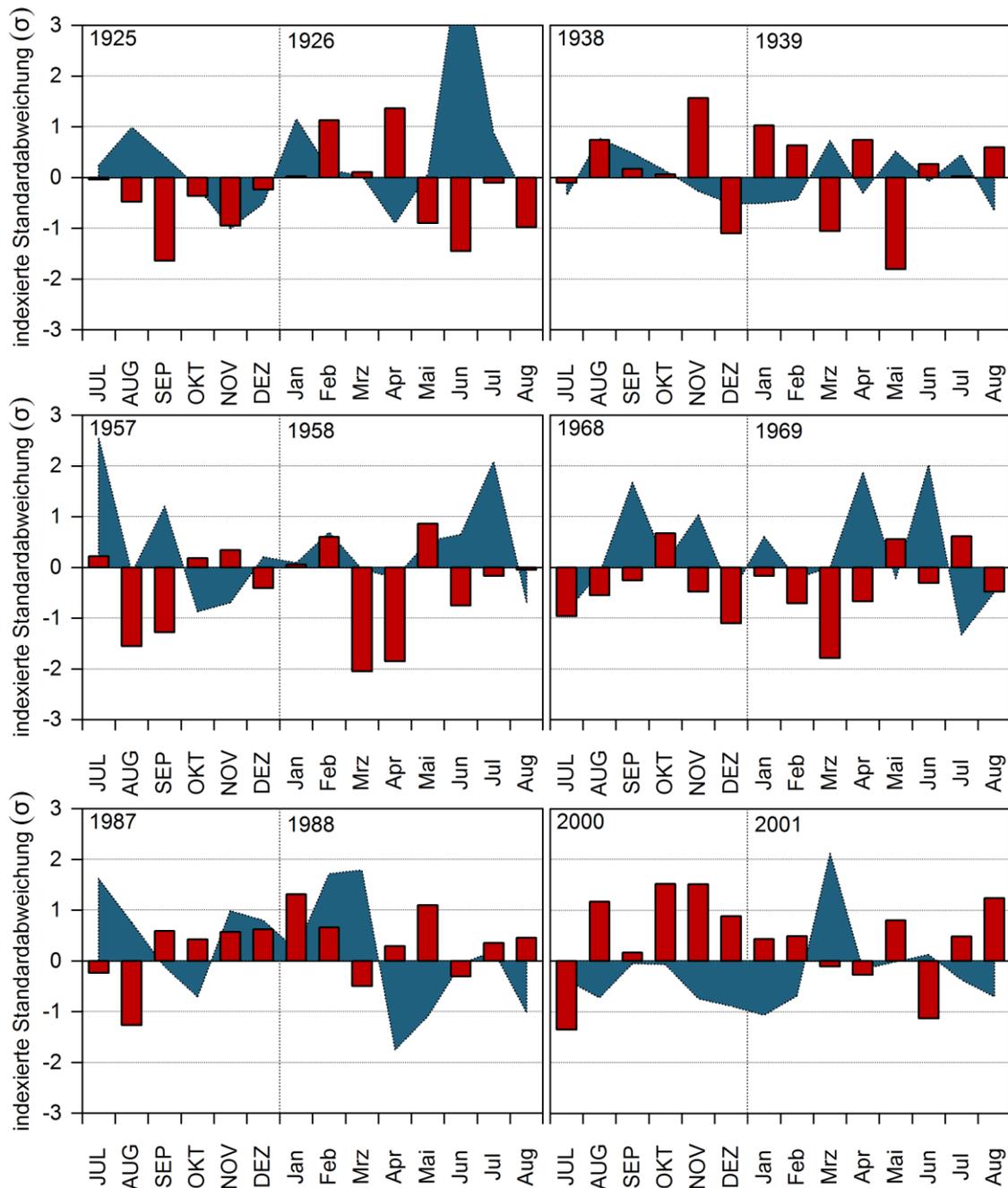


Abbildung 4.26 Witterungsverlauf in den sechs positiven Weiserjahren, die übereinstimmend am häufigsten bei allen Chronologien gemeinsam vorkommen. Rote Balken = Residuen der Temperatur, Blaue Flächen = Residuen des Niederschlags von Juli des Vorjahres bis August des aktuellen Jahres. Die Kreise markieren Perioden mit einer hohen Anzahl von Monaten unterdurchschnittlicher Temperaturen bei gleichzeitig durchschnittlichen bis hohen Niederschlägen.

Für das Jahr 1939 zeichnet sich der Mai durch eine kühle und feuchte Witterung aus, was für dieses Jahr wiederum eine Erklärung für die überdurchschnittlichen Zuwächse für insgesamt

acht Chronologien liefert. Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Zuwachssteuern sind die Niederschläge, die für die Jahre 1926, 1939, 1958 sowie 1969 von Mai bis Juni/Juli zumindest im langjährigen Mittel liegen, aber häufiger überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen in dieser Periode zeigen. Auch die Temperatur- und Niederschlagsbedingungen im März/April und der Einfluss der Vorjahreswitterung können für die Ausbildung der positiven Weiserjahren nicht ausgeschlossen werden. So lässt sich eine kühle und feuchte Witterung von Juli bis September im Vorjahr der Weiserjahre 1926, 1958, 1969, 1988 beobachten.

Das Jahr 1926 hat für die Kultur-Birnen der Försterlingstraße als positiver Weiser keine Bedeutung, das gleiche gilt für das Jahr 1939 für die Ahornarten und für das Jahr 1958 für die Sommer-Linde (Tab. 4.12). Stellt man die Witterung der Jahre 1958 und 1969 dem Jahr 2001 gegenüber (Abb. 33), lässt sich für die Eichen und Rot-Buchen schlussfolgern, dass die Bildung positiver Weiserjahre hauptsächlich durch überdurchschnittliche Niederschlagsmengen von April bis Juni in der laufenden Vegetationsperiode und zusätzlich durch günstige Wachstumsbedingungen im Vorjahressommer und -herbst induziert wird. Im Gegensatz dazu reagieren die Ahorne eher auf die Witterung des aktuellen Jahres reagierten (1975, 2001).

Genau wie für die negativen Weiserjahre wurde im Folgenden eine Einteilung der Witterungsbedingungen vorgenommen, die mit einem häufigen Vorkommen positiver Weiserjahre assoziiert werden können.

1. Überdurchschnittliche Niederschläge sowie unterdurchschnittliche Temperaturen während der gesamten Vegetationsperiode von April bis Juli Bsp. 1958, 1981:
Grundsätzlich alle Baumarten

1.1. Überdurchschnittliche Niederschläge während der gesamten Vegetationsperiode von April bis Juli in einem Monat mind. $\sigma > 1,5$ und günstige Wachstumsbedingungen im Vorjahr (hohe Niederschläge, geringe Temp. von Juli bis Sept, überdurchschnittliche Temp. im Okt) Bsp. 1958, 1987, 1997: Rot-Buche, Rot-Eiche, Trauben-Eiche

1.1. Hohe Niederschläge (mind. einen Monat $\sigma > 1$) und durchschnittliche Temperaturen im März/April (mind. einen Monat $\sigma < \pm 1$) sowie überdurchschnittliche Niederschläge im Juni ($\sigma > 1,5$) in der aktuellen Vegetationsperiode und günstige Wachstumsbedingungen im Vorjahresherbst Bsp. 1969: Ahornblättrige Platane, Tauben-Eiche, Rot-Eiche, Winter-Linde

1.1. Hohe Niederschläge (mind. einen Monat $\sigma > 1,5$) und durchschnittliche Temperaturen im März/April ($\sigma < \pm 1$) sowie unterdurchschnittliche Temperaturen ($\sigma < -1$) und durchschnittliche Niederschlagsmengen ($\sigma < \pm 1$) im Juni in der aktuellen Vegetationsperiode Bsp. 2001: Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn, Kultur-Birne, Ahornblättrige Platane.

Superposed epoch analysis

In den Abbildungen 4.27 und 4.28 sind die gemittelten Indexwerte der Jahre 1934, 1954, 1963, 1964, 1973, 1983, 1984, 1991, 1992, 1993, 1998 und 2003 in alphabetischer Reihenfolge nach den Artnamen geordnet dargestellt. In diesen Jahren wurden die niedrigsten Werte des scPDSI vom März bis Juli im Zeitraum 1920 bis 2007 und damit die höchsten Wasserdefizite ermittelt. Der Indexwert im Jahr „0“ entspricht den gemittelten indexierten Radialzuwachs der Trockenjahre, das Jahr 1 den gemittelten Indexwerten im ersten Folgejahr nach dem Trockenjahr.

Alle drei Chronologien des **Spitz-Ahorns** reagieren mit einem signifikanten Zuwachsrückgang im Trockenjahr. Beim Betrachten der Ergebnisse für die Ahornarten wird für alle Standorte neben den signifikanten Zuwachsreduktionen ein überdurchschnittlicher Zuwachs im zweiten Folgejahr sichtbar, der für die Lilienthalstraße (ApLIL) sogar signifikant über dem durchschnittlichen Radialzuwachs liegt (Abb. 4.27).

Der **Berg-Ahorn** auf der Sachsenwerkstraße (ApsBER) zeigt eine ähnliche Zuwachsdynamik wie der Spitz-Ahorn des gleichen Standortes, mit einem signifikant geringeren Zuwachs in den gemittelten Trockenjahren und einen leicht überdurchschnittlichen Zuwachs im zweiten Folgejahr (Abb. 4.27). Im Trockenjahr ist der Indexwert für den Berg-Ahorn jedoch niedriger als für den Spitz-Ahorn.

Ein besonders starker Zuwachsrückgang im Trockenjahr konnte für die **Rot-Buchen** des Borsberges festgestellt werden (Abb. 4.27). Dagegen zeigen die Buchen auf den frischen-feuchten Standorten keine signifikanten Zuwachsrückgänge in den selektierten Jahren. Für alle Buchen-Chronologien wurden signifikante Zuwachssteigerungen im vierten Folgejahr nach der Trockenheit analysiert. Betrachtet man sich die Radialzuwächse dieser Jahre (1938, 1958, 1967, 1968, 1977, 1987, 1988, 1995, 1996, 1997, 2002, 2007) genauer, so fällt auf, dass sich die Jahre 1958, 1987, 1988, 1996 und 1997 durch stark wachstumsfördernde Witterungsbedingungen hervorheben (vgl. Abb. 4.26), auf die eine große Anzahl der positiven Weiserjahre der Rot-Buche entfällt.

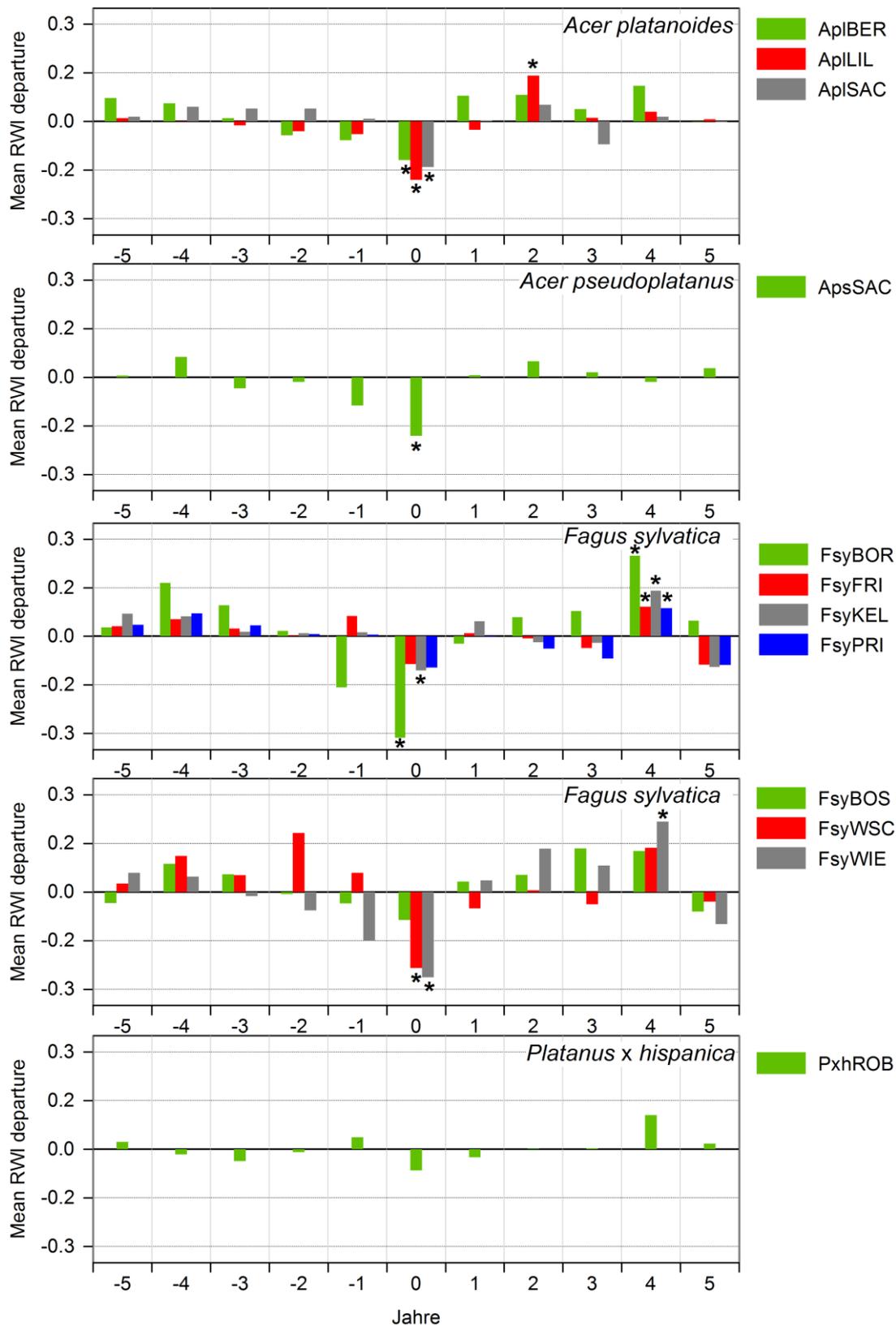


Abbildung 4.27 Mittlere Abweichung des Indexwertes für die Trockenjahre von *Acer* bis *Platanus*. Das Jahr 0 entspricht dem Mittelwert des Zuwachses der Trockenjahre, -5 fünf Jahre vorher, +5 fünf Jahre danach usw. Mit Sternchen markierte Abweichungen unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$) vom durchschnittlichen Zuwachs. Für die Chronologien ApIBER, FsyBOS, FsyWIE wurden nur die 10 Trockenjahre von 1963 bis 2004 analysiert.

Analog zu den trockenen Waldstandorten reduziert sich der Zuwachs der Stadtbäume der Rot-Buchen für die beiden Chronologien FsyWSC und FsyWIE im Trockenjahr sehr stark. Dagegen wurden keine markanten Zuwachsabweichungen für FsyBOS berechnet, in die allerdings nur die Jahre ab 1963 zur einer superpoded epoch gemittelt wurden.

Ein signifikanter Rückgang der Zuwachsleistung für die **Ahornblättrige Platane** (PxxROB) kann mit den selektierten Jahren nicht berechnet werden (Abb. 4.27). Dennoch zeigt auch diese Baumart einen Rückgang der Zuwachsleistung, der sich auch im ersten Folgejahr noch leicht unterhalb des durchschnittlichen Indexwertes bewegt und erst im zweiten Folgejahr übersteigt. Genauso wie für viele der Rot-Buchen weicht der Indexwert, wenn auch nicht signifikant, im vierten Folgejahr stärker vom Mittelwert ab als im Trockenjahr, was wiederum auf die Häufung von positiven Weiserjahren zurückzuführen ist.

Unter alle untersuchten Baumarten konnte nur für zwei Chronologien auch in Trockenjahren ein durchschnittlicher oder überdurchschnittlicher Zuwachs berechnet werden. Eine davon ist die Chronologie der **Kultur-Birnen** auf der Bernhard-Shaw-Straße (Abb. 4.28). Dagegen entsprechen die Zuwachsmuster der Bäume auf der Försterlingstraße dem Schema einer signifikanten Zuwachsreduktion im Trockenjahr und einer darauffolgenden Erholung im ersten Folgejahr.

Im statistischen Vergleich zum langjährigen Mittel ergibt sich keine nachweisbare Abweichung im Radialzuwachs für die Stadtbäume der **Trauben-Eiche** (QrsWSC), wohl aber die die Waldbäume. Im Trockenjahr findet sich für die Waldbäume die stärkste Abweichung des Zuwachsindex unter allen elf betrachteten Jahren für diese Baumart im Zeitraum vom fünften Vortrockenjahr bis zum fünften Folgejahr nach der Trockenheit (Abb. 4.28).

Damit ähneln die gemittelten indexierten Zuwächse der Trauben-Eichen des trockenen Waldstandortes Borsberg in ihrer Entwicklung sehr stark denen der **Rot-Eichen** des gleichen Standortes. Unter allen fünf Chronologien der Rot-Eichen wurden nur noch für die Stübelallee (QruSTU) signifikante Zuwachsrückgänge berechnet. Auf allen anderen Standorten der Rot-Eiche vermindert sich zwar der Radialzuwachs im Trockenjahr, aber unter der Signifikanzschwelle (Abb. 4.28). Dennoch kann hier behauptet werden, dass sich alle Eichen-Chronologien (Trauben-Eichen und Rot-Eichen) eher durch mäßige Reduktionen in den betrachteten Trockenjahren auszeichnen.

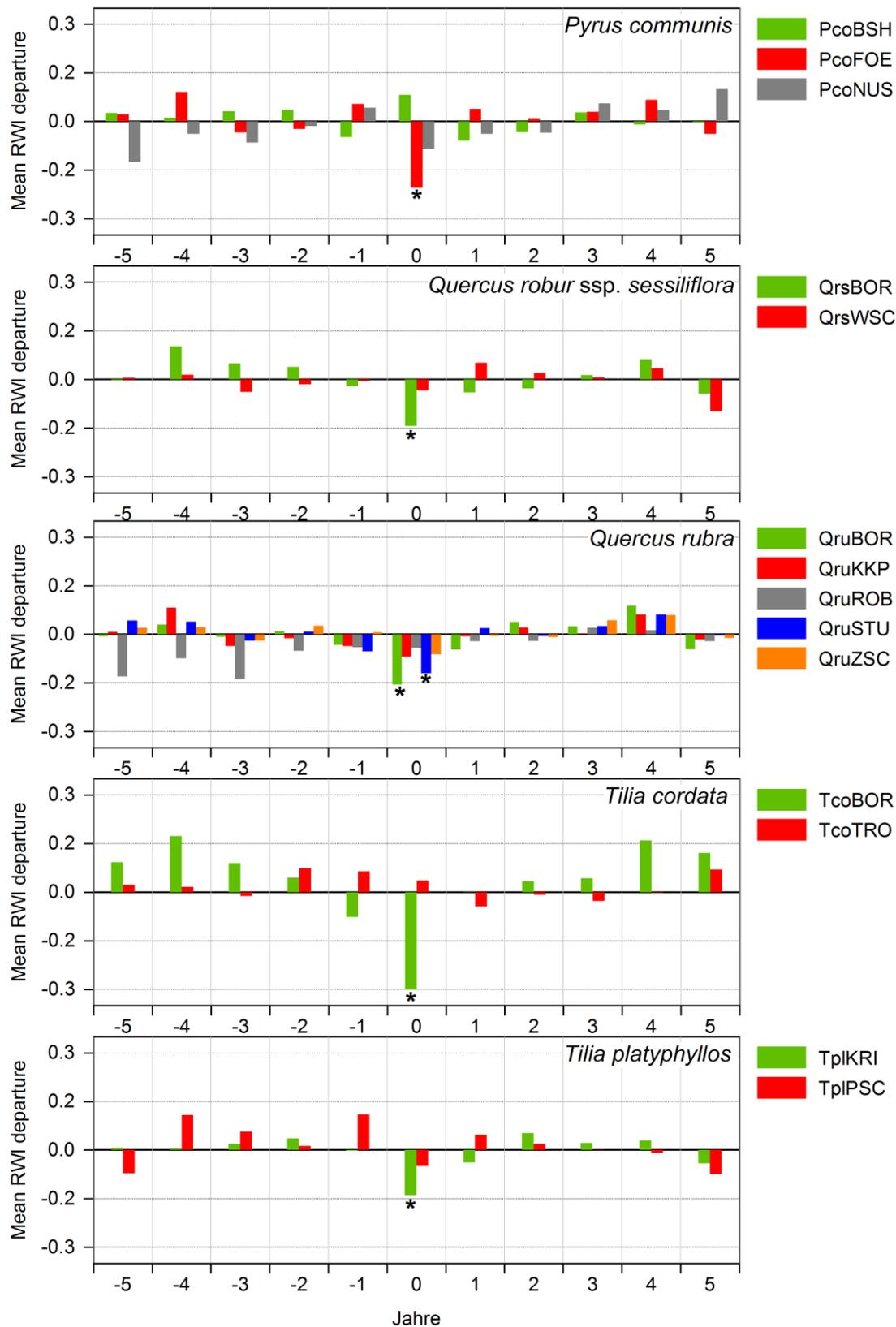


Abbildung 4.28 Mittlere Abweichung des Indexwertes für die Trockenjahre von *Pyrus* bis *Tilia*. Das Jahr 0 entspricht dem Mittelwert des Zuwachses der Trockenjahre, -5 fünf Jahre vorher, +5 fünf Jahre danach usw. Mit Sternchen markierte Abweichungen unterscheiden sich signifikant ($P < 0,05$) vom durchschnittlichen Zuwachs. Für die Chronologien PcoBSH, PcoNUS und QruROB wurden nur die 10 Trockenjahre von 1963 bis 2004 analysiert.

Die **Winter-Linden** der Tronitzer Straße (TcoTRO) zeigen genau wie die Kultur-Birnen (PcoBSH) eine Zuwachssteigerung im Trockenjahr gegenüber der mittlern Zuwachsleistung. Ein auffälliger Gegensatz dazu wurde für die Waldbäume analysiert (Abb. 4.28). Die Waldbäume schränken Ihren Radialzuwachs in den Trockenjahren sehr stark ein. Gemeinsam mit den Rot-Buchen des gleichen Standortes, zeigen die Winter-Linden damit die geringsten Zuwächse in Trockenjahren aller Baumarten und Standorte.

Während die Zuwachsmuster der **Sommer-Linden** auf der Krippener Straße einen signifikanten Einfluss der gemittelten Trockenjahre erkennen lassen, rufen die selektieren trockenen Jahre keine signifikante Verringerung der Zuwachsleistung auf der Peter-Schmoll-Straße (TplPSC) hervor (Abb. 4.28).

Für die Waldbäume der Rot-Buchen (FsyBOR) und der Winter-Linden (TcoBOR) des trockenen Standortes Borsberg konnten die stärksten Zuwachsrückgänge aller Chronologien (Indexwerte $< 0,6$) berechnet werden. Demgegenüber lassen sich zwar signifikante, aber geringere Rückgänge bei den Trauben- und Rot-Eichen auf der gleichen Fläche feststellen. Alle Baumarten erreichen das durchschnittliche Zuwachsniveau erst ab dem zweiten Folgejahr. Damit wird auf diesen Standort ein stark nachwirkender Einfluss von Zuwachsreduktionen infolge von Trockenheit sichtbar. Für die drei weiteren Waldstandorte der Rot-Buche (Friedrichsgrund (FsyFRI), Kellerbrücke (FsyKEL) und Prießnitz (FsyPRI), konnten auch geringere indexierte Radialzuwächse berechnet werden. Hier sind jedoch keine Effekte auf den nachfolgenden Zuwachs ins erste Folgejahr zu beobachten.

Im Gegensatz dazu reagieren die Stadtbäume eher uneinheitlich, so dass es deutlich schwieriger ist eindeutige Reaktionsschemen abzuleiten. Trotzdem lässt sich übereinstimmend zum trockenen Waldstandort feststellen, dass mehrwöchige Trockenperioden während der aktuellen Vegetationszeit bis zum August zu einer starken Verminderung des Radialwachstums bei den Rot-Buchen führen. Auch die Spitz- und Bergahorne reagieren mit einem deutlichen Zuwachsrückgang. Die Rot- und Trauben-Eichen der urbanen Standorte zeigen dagegen wiederum nur mäßige Reaktionen in Trockenjahren.

4.4 Bodenwasserhaushalt der urbanen Standorte für die physiologischen Messungen in den Jahren 2009 und 2010

Die Abbildungen 4.29 und 4.30 zeigen das Bodenmatrixpotential und den volumetrischen Bodenwassergehalt für die beiden Untersuchungsperioden 2009 und 2010 auf den vier Standorten. Aufgrund der häufigeren Messungen im Jahr 2010 sind die Auflösung ($n = 22$ Tage) und damit die Aussagekraft für diese Messperiode höher als im Jahr 2009 ($n = 12$ Tage). Die teilweise fehlenden Messreihen des Bodenmatrixpotentials sind mit dem Überschreiten des Messbereichs der Tensiometer in Phasen mit stark negativen Bodenmatrixpotentialen unter -700 hPa verbunden.

Für alle Standorte lässt sich eine Änderung des Bodenwassergehaltes und des Bodenmatrixpotentials über die Zeit beobachten. Dabei konnten für das Jahr 2009 besonders geringe Werte von Anfang bis Mitte Juli sowie von Anfang bis Mitte August und im Folgejahr 2010 vom 25. Juni bis zum 02. Juli sowie in einer zweiten Periode vom 12. bis 21. Juli beobachtet werden.

Zwischen den auch räumlich nahe beieinander liegenden Straßenbaumstandorten Lilienthalstraße (Abb. 4.29), Robert-Berndt-Straße und Sachsenwerkstraße (Abb. 4.30) zeigt sich auch eine starke Ähnlichkeit im Verlauf und im Niveau des Wassergehaltes und der Spannung. Für diese drei Standorte belegen die Daten und die statistische Auswertung eine deutliche Differenzierung des volumetrischen Bodenwassergehaltes nach der Bodentiefe (Abb. 4.31), mit grundsätzlich geringeren Werten in den oberflächennahen Tiefen. Das Bodenmatrixpotential zeigt zumindest für die Messperiode im Jahr 2010 eine ähnliche Staffelung. Für die Bodentiefen bis 40 cm kann eine stärkere Amplitude des Bodenmatrixpotentials beobachtet werden, was durch ein schnelles Austrocknen bei trocken-heißer Witterung, aber auch einem raschen Anstieg des Potentials bei Niederschlagsereignissen erklärt werden kann.

Dieser relativ einheitlichen Gruppe steht der sandige Straßenbaumstandort der Krippener Straße gegenüber (Abb. 4.29). Hier ist der volumetrische Bodenwassergehalt mit Werten von nur maximal 20 Vol.% generell geringer, und auch die Unterschiede im Wassergehalt zwischen den Bodentiefen sind nur unwesentlich ausgeprägt. Zudem sinkt das Bodenmatrixpotential im Gegensatz zu den drei anderen Straßenbaumstandorten niemals unter -700 hPa. Interessant ist außerdem, dass hier die oberflächennahen 10 bis 20 cm tief gelegenen Schichten einen signifikant höheren Bodenwassergehalt aufweisen als Bodentiefen unter 40 cm (Abb. 4.31).

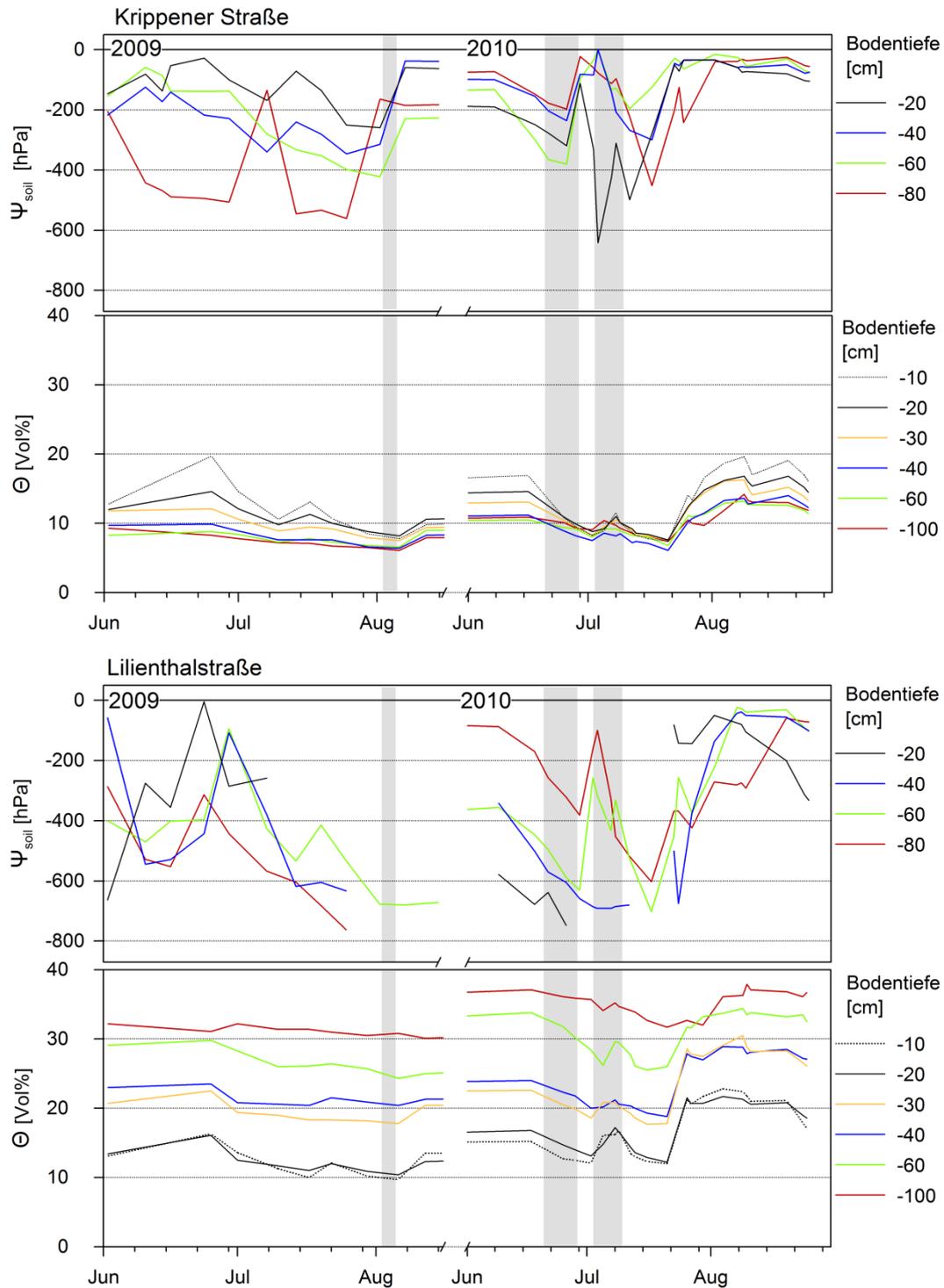


Abbildung 4.29: Saisonaler Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Ψ_{soil}) und des volumetrischen Bodenwassergehaltes (Θ) für die Straßenbaumstandorte Krippener Straße und Lilienthalstraße im Zeitraum vom 01.06. bis zum 16.08.2009 ($n = 12$ Messtermine) sowie vom 01.06. bis zum 31.08.2010 ($n = 22$ Messtermine). Der Verlauf wurde aus den einzelnen Tagesmesswerten ermittelt. Graue Balken markieren mehrtägige atmosphärische Trockenperioden mit aufeinander folgenden Werten eines VPD von über 10 hPa (Daten der Station Dresden-Klotzsche).

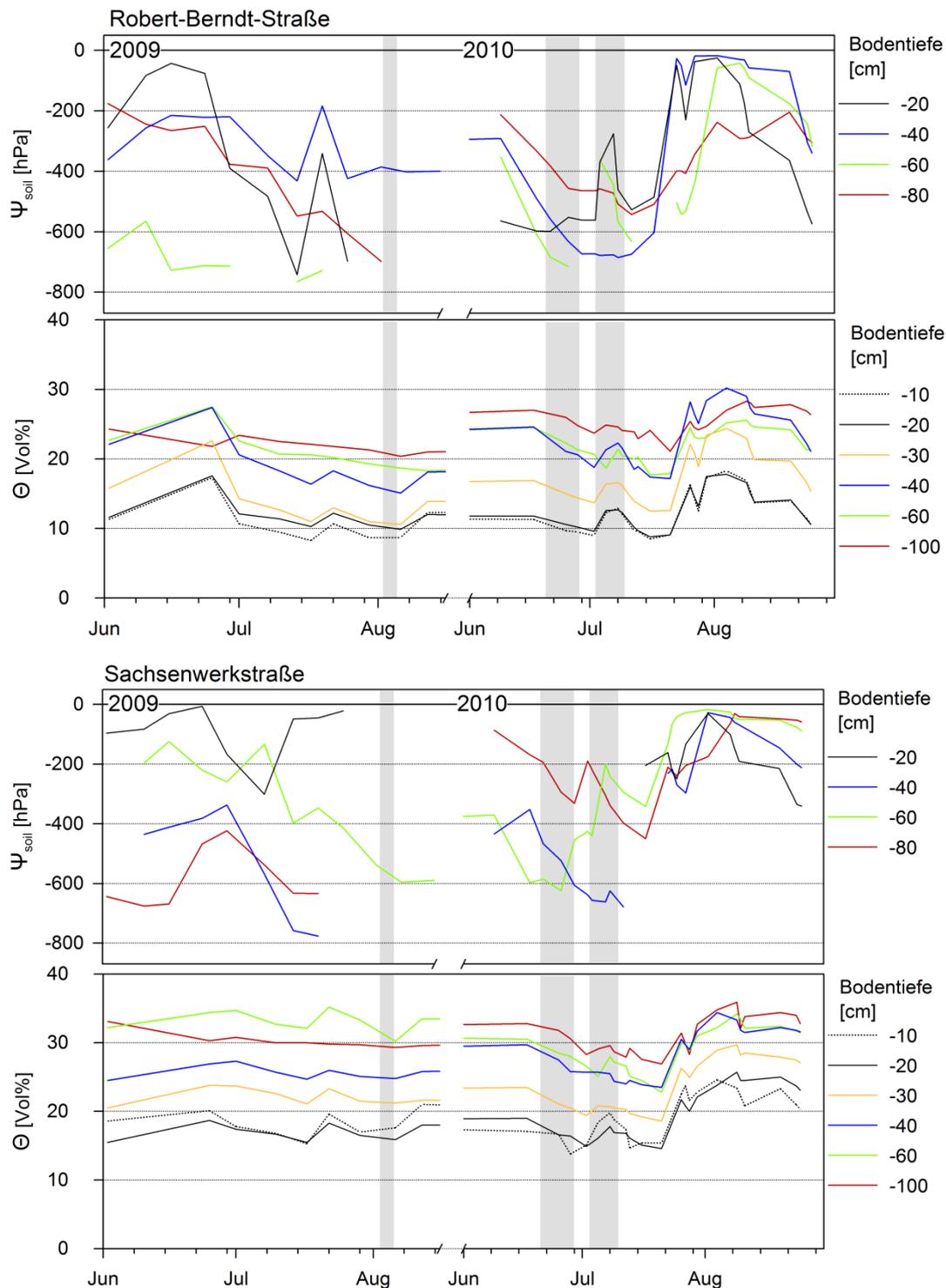


Abbildung 4.30: Saisonaler Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Ψ_{soil}) und des volumetrischen Bodenwassergehaltes (Θ) für die Straßenbaumstandorte Robert-Berndt-Straße und Sachsenwerkstraße im Zeitraum vom 01.06. bis zum 16.08.2009 ($n = 12$ Messtermine) sowie vom 01.06. bis zum 31.08.2010 ($n = 22$ Messtermine). Der Verlauf wurde aus den einzelnen Tagesmesswerten ermittelt. Graue Balken markieren mehrtägige atmosphärische Trockenperioden mit aufeinander folgenden Werten eines VPD von über 10 hPa (Daten der Station Dresden-Klotzsche).

Gemeinsamkeiten im Niveau des Bodenwassergehaltes zwischen der Krippener Straße und den restlichen Standorten finden sich nur bis zu einer Bodentiefe von 30 cm (Abb. 4.31). Ab einer Bodentiefe von 40 cm unterscheidet sich der Bodenwassergehalt für die Krippener deutlich und signifikant von den gleichen Tiefen der übrigen Straßenbaumstandorte.

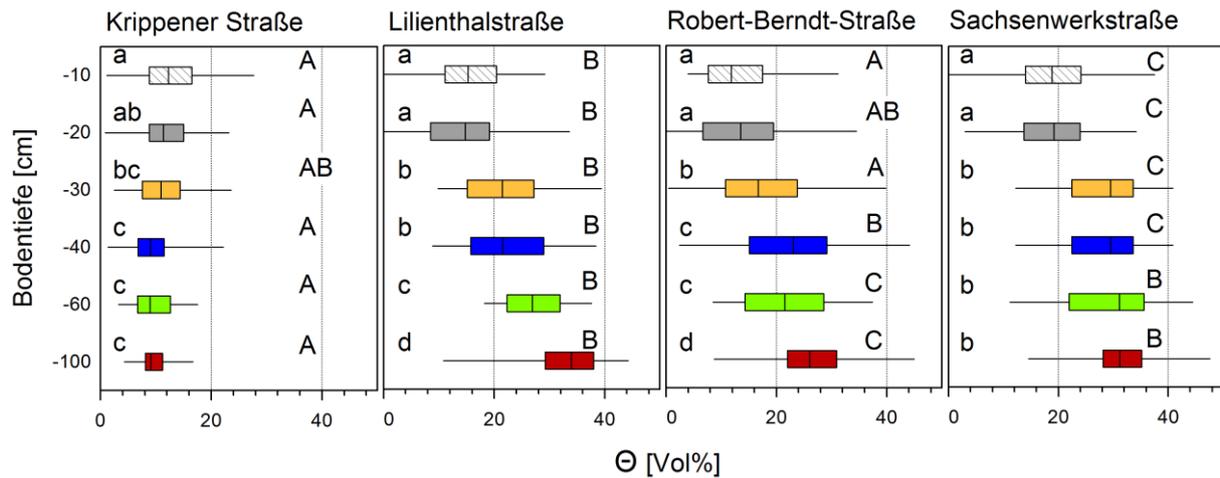


Abbildung 4.31: Volumetrischer Bodenwassergehalt in den beiden Messperioden nach Bodentiefen und Standorten. Unterschiedliche Buchstaben verweisen auf signifikante Unterschiede. Kleinbuchstaben stehen für einen vertikalen Vergleich, also einen Vergleich des Bodenwassergehaltes nach Bodentiefe für die betreffende Straße, und Großbuchstaben für einen Vergleich zwischen den vier Straßenbaumstandorten.

4.5 Blatt-Wasserpotential

Die Tagesminima der Blatt-Wasserpotentiale (Ψ_{\min}) in den Vegetationsperioden 2009 und 2010 für die Baumarten auf der Robert-Berndt-Straße und der Krippener Straße sind in Abbildung 40 gegenübergestellt. Auf der Krippener Straße liegen die gemessenen Blatt-Wasserpotentiale zwischen -0,8 (Sommer-Linde) und -2,4 MPa (Sommer-Linde) und auf der Robert-Berndt-Straße zwischen Maxima von -1,1 (Ahornblättrige Platane) bis Minima von -3,5 MPa (Rot-Eiche).

Für beide Jahre zeigen sich für die Baumarten der Rot-Eiche, Sommer-Linde und Holländischen Linde zunehmend negativere Blatt-Wasserpotentiale im Verlauf des Sommers. Dagegen konnte für die Ahornblättrige Platane nur eine geringe Variation im saisonalen Verlauf ermittelt werden.

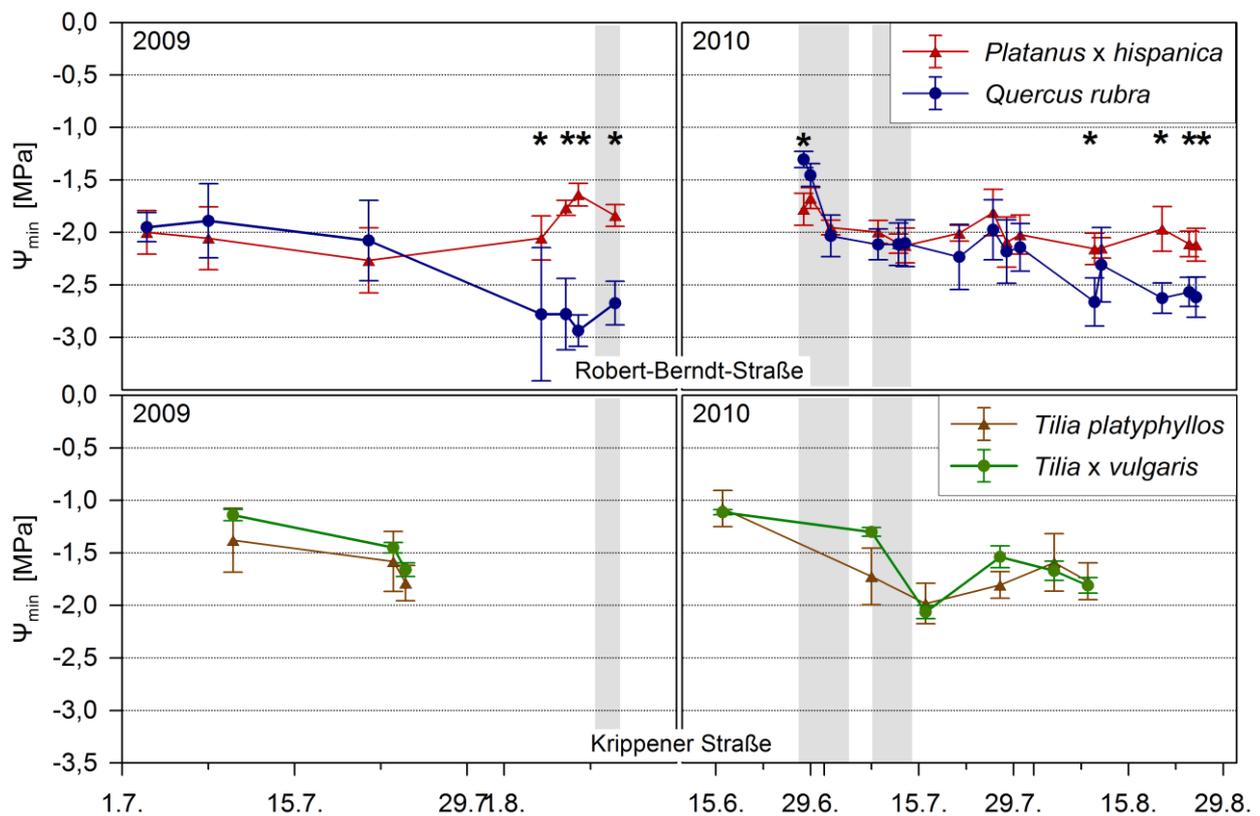


Abbildung 4.32: Tagesminima der Blatt-Wasserpotentiale Ψ_{\min} mit Angaben des Median und der Standardabweichung in den Untersuchungsperioden 2009 und 2010. Signifikante Unterschiede zwischen den Baumarten eines Standortes sind mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet. Graue, vertikale Balken markieren mehrtägige Trockenperioden.

Im Vergleich der Ahornblättrigen Platane mit der Rot-Eiche auf der Robert-Berndt-Straße werden die Unterschiede im Blatt-Wasserpotential im Laufe des Sommers zunehmend größer und führen dazu, dass sich die Blatt-Wasserpotentiale zwischen den beiden Arten im Verlauf des August stets signifikant unterscheiden. Dagegen konnten für die beiden Lindenarten auf der Krippener Straße keine nachweisbaren Unterschiede zwischen den Tagesminima berechnet werden.

4.6 Gaswechsellanalytik

4.6.1 Transpiration und stomatäre Leitfähigkeit

Die gemittelten Leistungen der Transpiration und der stomatären Leitfähigkeit wurden zunächst separat über die jeweiligen Messwerte der Jahre 2009 und 2010 mittels Box-Whisker-Plots zusammengestellt (Abb. 4.33). Generell kann damit festgestellt werden, dass Baumarten mit einer hohen Transpirationsleistung auch eine hohe stomatäre Leitfähigkeit aufweisen.

In beiden Jahren wurden Höchstwerte der Transpiration bis maximal $2,3 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ für die Ahornblättrigen Platane und die niedrigsten Werte für den Spitz-Ahorn gemessen. Für alle

sechs Baumarten finden sich im Jahr 2010 höhere Werte der Transpiration, aber auch der stomatären Leitfähigkeit bis maximal $92,1 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (*Q. rubra*). Im Jahr 2010 stimmen die mittleren Transpirationsleistungen der Baumarten Berg-Ahorn, Ahornblättrige Platane, Rot-Eiche sowie der Sommer-Linde einerseits und des Spitz-Ahorns und der Holländischen Linde andererseits signifikant überein. Eine ähnliche Einordnung lässt sich für die stomatäre Leitfähigkeit erkennen. Hier lässt sich eine Gruppierung von Arten mit hohen Leitfähigkeiten durch die Ahornblättrige Platane, Rot-Eiche und Sommer-Linde und mit einer niedrigen stomatären Leitfähigkeit für die Ahorne vornehmen. Sowohl die Transpiration als auch die stomatäre Leitfähigkeit der Holländischen Linde belegen eine Mittelstellung zwischen den beiden Gruppen.

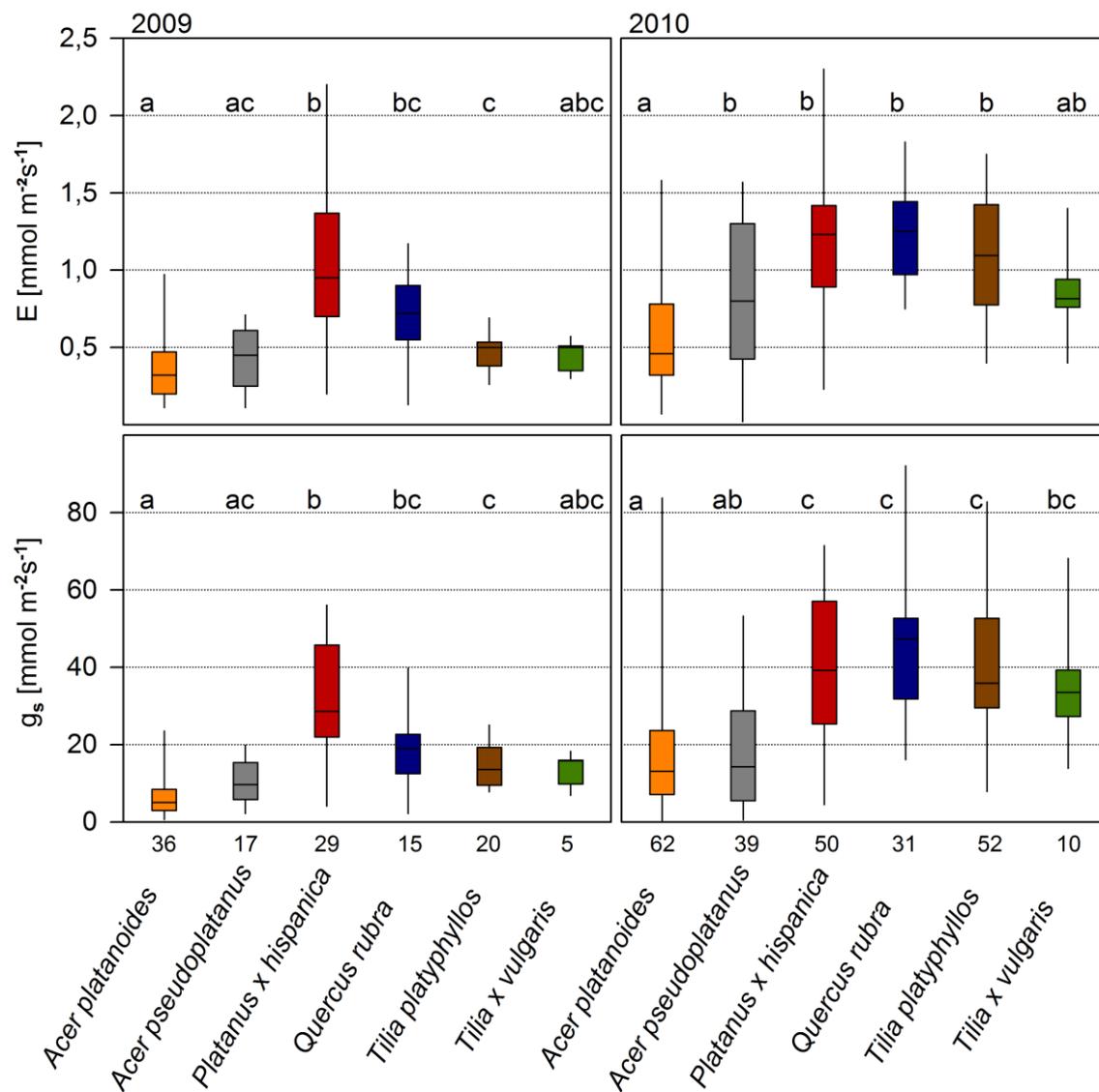


Abbildung 4.33: Transpirationsraten (E) und stomatäre Leitfähigkeiten (g_s) in den Jahren 2009 und 2010. Für jedes Jahr sind die signifikanten Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Arten mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet. Angaben zur Anzahl der Gaswechsellmessungen je Art finden sich oberhalb der Artbezeichnung.

Zeitgleiche Messungen an unterschiedlichen Arten bieten die Möglichkeit, die Transpirationsraten tagesweise direkt gegenüberzustellen. In den Abbildungen 4.34 und 4.35 sind die Transpirationsraten (E) bzw. die stomatären Leitfähigkeiten (g_s) im saisonalen Verlauf mit den korrespondierenden Messungen dargestellt. Grundsätzlich bestätigen sich dabei die Ergebnisse für die jahresweise ermittelten Werte. So können im Baumartenvergleich für *P. x hispanica* und *Q. rubra* auf der Robert-Berndt-Straße zumeist höhere Werte beobachtet werden. Im direkten Tagesvergleich zeigen sich im Jahr 2009 signifikante Übereinstimmungen der Transpirationsleistung und stomatären Leitfähigkeit von *A. platanoides* (Lilienthalstraße) zu *A. pseudoplatanus* (Sachsenwerkstraße) und von *T. platyphyllos* zu *T. x vulgaris* (beide auf der Krippener Straße). Auf der Robert-Berndt-Straße wurde für *P. x hispanica* für die Parallelmessungen im Jahr 2009 stets höhere stomatäre Leitfähigkeiten und am 04.08.2009 auch eine höhere Transpirationsleistung gegenüber *Q. rubra* ermittelt.

In den beiden Trockenperioden vom 27.06 bis zum 04.07.2010 und vom 08.07 bis 14.07.2010 zeigt *A. pseudoplatanus* höhere Transpirationsraten und Leitfähigkeiten als *A. platanoides*.

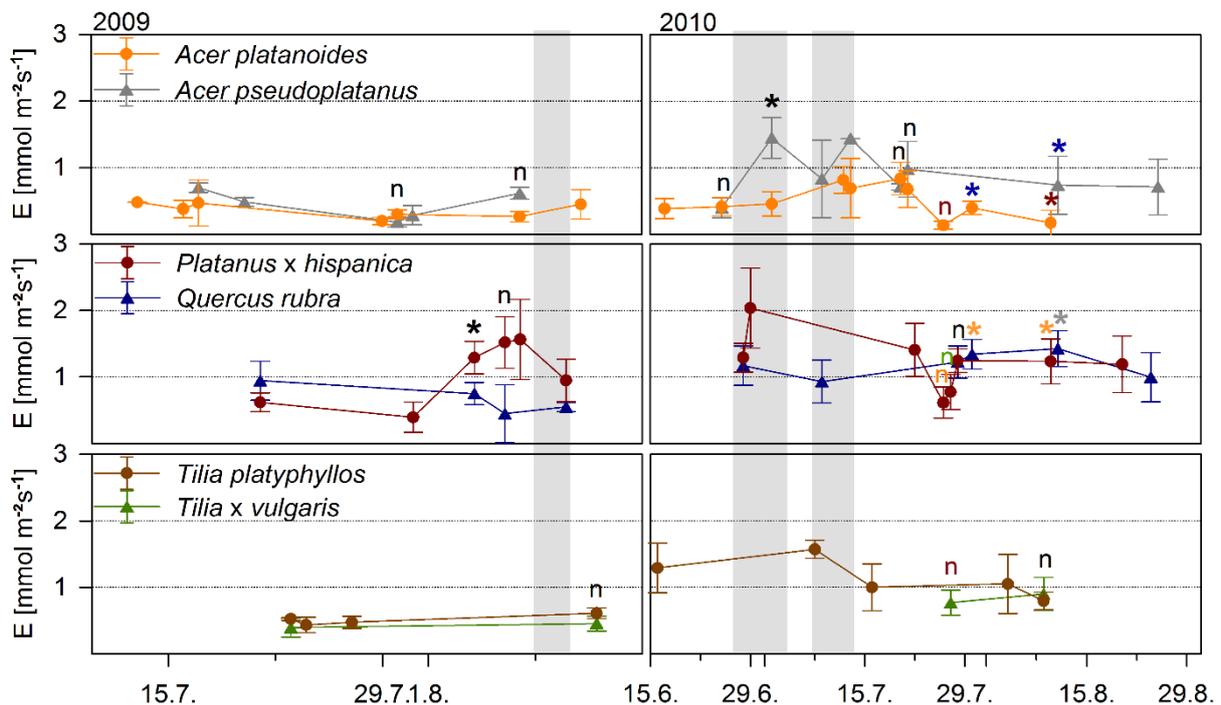


Abbildung 4.34: Transpirationsraten (E) der Tagesmessungen im saisonalen Vergleich der Jahre 2009 und 2010. Sternchen (*) markieren Parallelmessungen an zwei Arten, die sich in ihren Transpirationsraten signifikant unterscheiden und mit (n) gekennzeichnete Messungen zeigen keine statistischen Unterschiede. Schwarze Symbole verweisen auf einen Vergleich der beiden Arten eines Fensters. Farbige Symbole verweisen auf einen Vergleich mit der in der entsprechenden Farbe markierten Art. Mehrtägige atmosphärische Trockenperioden sind durch grau hinterlegte, vertikale Felder angezeigt.

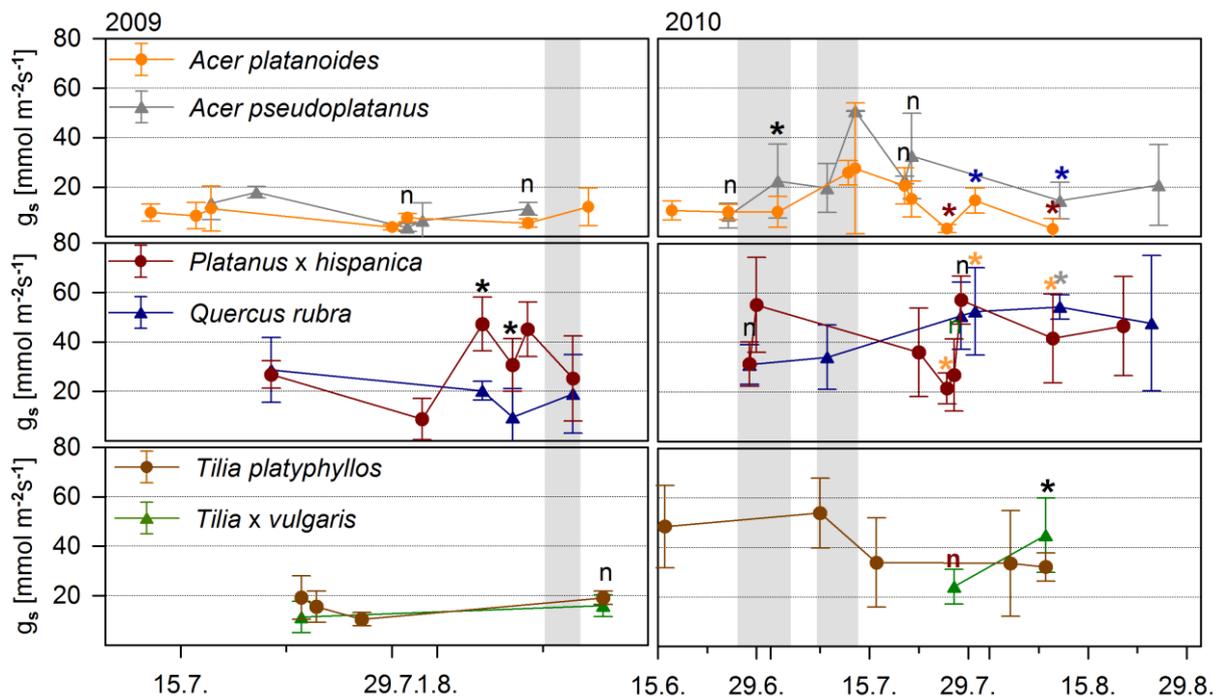


Abbildung 4.35: stomatäre Leitfähigkeiten (g_s) der Tagesmessungen im saisonalen Vergleich der Jahre 2009 und 2010. Sternchen (*) markieren Parallelmessungen an zwei Arten, die sich in ihrer stomatären Leitfähigkeit signifikant unterscheiden und mit (n) gekennzeichnete Messungen zeigen statistische Übereinstimmungen an. Schwarze Symbole verweisen auf einen Vergleich der beiden Arten eines Fensters. Farbige Symbole verweisen auf einen Vergleich mit der in der entsprechenden Farbe markierten Art. Mehrtägige atmosphärische Trockenperioden sind durch grau hinterlegte, vertikale Felder angezeigt.

4.6.2 Photosynthese und WUE

Im Folgenden werden die lichtgesättigten Netto-Photosyntheseraten und die WUE zunächst wieder jahresweise zusammengestellt (Abb. 4.36) und anschließend unter Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik verglichen.

Die höchsten Werte der Netto-Photosynthese unter Lichtsättigung mit über $8 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \text{ s}$ konnten bei *P. x hispanica* und *Q. rubra* gemessen werden (Abb. 4.36). Gleichzeitig zeigen sich in beiden Jahren signifikante Unterschiede in den Netto-Photosyntheseraten von *P. x hispanica* und *Q. rubra* zu den restlichen Baumarten. Analog zu den Ergebnissen für die Transpiration fallen im Jahr 2010 wiederum die grundsätzlich höhere Streuung, aber auch die höheren Mediane und Maximalwerte als im Vorjahr auf.

Auch für die WUE lässt sich eine Differenzierung zwischen der Gruppe der Ahorn- und Lindenarten einerseits und der Gruppe der Ahornblättrigen Platane und der Rot-Eiche andererseits treffen. Im Jahr 2010 ist die Effizienz der Wassernutzung der Rot-Eichen mit einem Median von $3,56 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ und der Ahornblättrigen Platane mit einem Median von $3,86 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ deutlich höher und weicht signifikant von den anderen Arten ab.

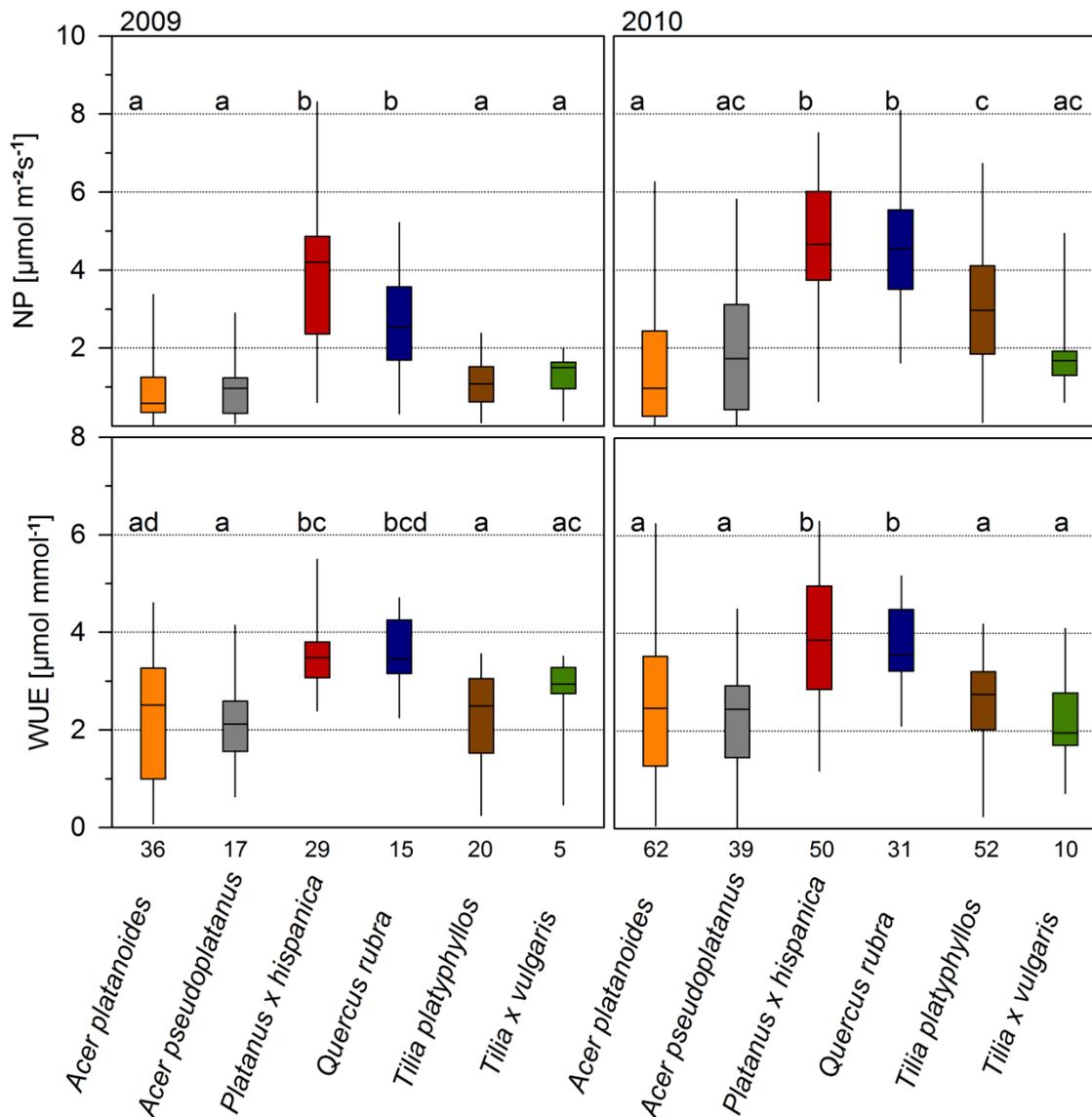


Abbildung 4.36: Netto-Photosynthese (NP) und Wassernutzungseffizienz (WUE) in den Jahren 2009 und 2010. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Arten sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet. Angaben zur Anzahl der Gaswechsellmessungen je Art befinden sich für jedes Jahr oberhalb der Artbezeichnung.

Im Jahr 2010 zeigt die Holländische Linde mit einer WUE von lediglich $1,96 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ den niedrigsten Median. Der Maximalwert wurde am 26.07.2010 mit $6,30 \mu\text{mol}/\text{mmol}$ für die Ahornblättrige Platane ermittelt. Damit belegen die Ergebnisse für die Rot-Eichen und die Ahornblättrigen Platanen eine durchschnittlich 1,5-mal höhere Effizienz der Wassernutzung gegenüber den Ahornen und Linden. Im Jahr 2009 ist die statistische Trennung in die beiden genannten Gruppen weniger scharf, da hier auch Gemeinsamkeiten zwischen den Werten von *P. x hispanica* bzw. *Q. rubra* mit *T. x vulgaris* sowie zwischen *A. platanoides* und *Q. rubra* festgestellt werden konnten. Trotzdem finden sich im Vergleich auch hier höhere Werte bei *Q. rubra* und *P. x hispanica*. Erwähnt werden soll an dieser Stelle noch die starke Streuung für die Effizienz der Wassernutzung des Spitz-Ahorns. Dabei tritt diese nicht nur durch den Interquartilabstand, sondern auch durch die weit auseinander liegenden Minimal- und

Maximalwerte deutlich hervor. Demgegenüber kann für die Holländischen Linde und die Rot-Eiche eine geringe Streuung beobachtet werden.

In Abbildung 4.37 ist die Netto-Photosyntheseleistung über die beiden Messperioden im saisonalen Verlauf dargestellt. Dabei wird die höhere Netto-Photosynthese für *Q. rubra* und *P. x hispanica* zu den restlichen vier Arten auch im jeweiligen Jahresverlauf noch einmal sichtbar.

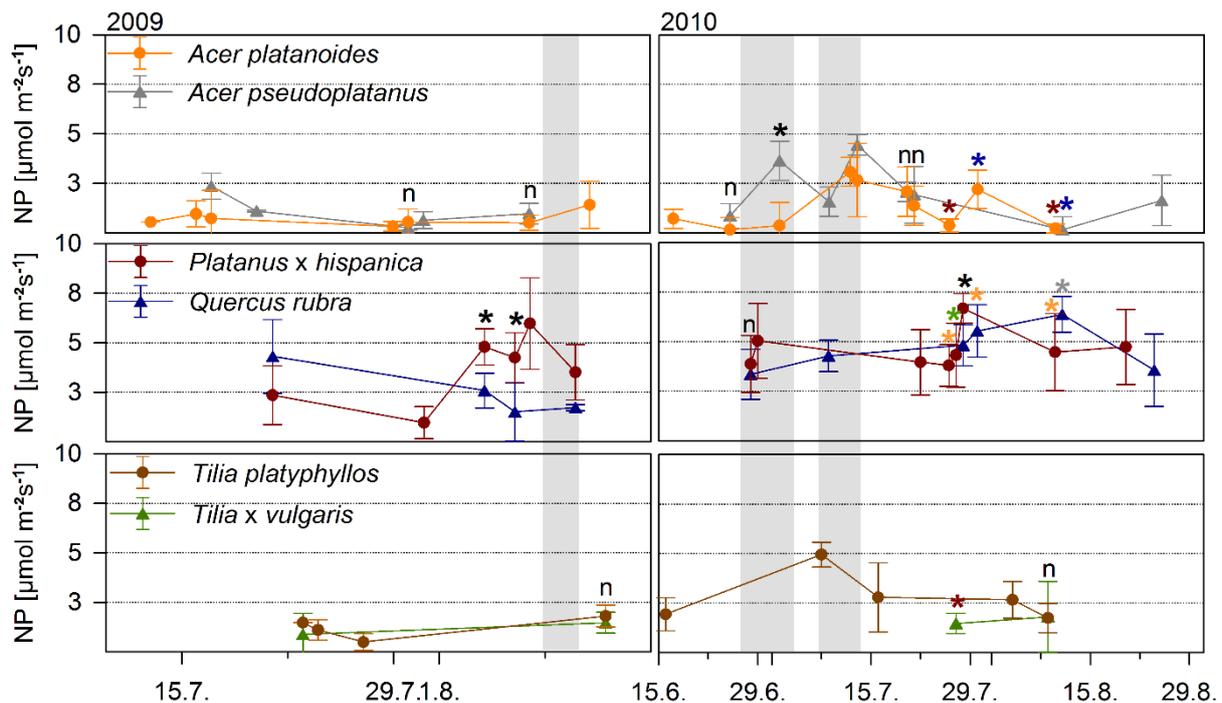


Abbildung 4.37: Netto-Photosyntheseraten (NP) der Tagesmessungen im saisonalen Vergleich der Jahre 2009 und 2010. Sternchen (*) markieren Parallelmessungen an zwei Arten, die sich in ihrer Netto-Photosynthese signifikant unterscheiden. Mit (n) gekennzeichnete Messungen markieren als statistisch gleich zu wertende Netto-Photosyntheseleistungen. Schwarze Symbole verweisen auf einen Vergleich der beiden Arten eines Fensters. Farbige Symbole verweisen auf einen Vergleich mit der in der entsprechenden Farbe markierten Art. Mehrtägige atmosphärische Trockenperioden sind durch grau hinterlegte, vertikale Felder angezeigt.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen für den tagesweisen Vergleich der Transpiration (vgl. Abb. 4.34), zeigt *P. x hispanica* an den drei Parallelmesstagen mit *Q. rubra* stets eine signifikant höhere Netto-Photosyntheserate. Die bereits für die Transpirationsleistung am 02.07.2010 festgestellten Differenzen im Reaktionsverhalten von Spitz- zu Berg-Ahorn werden auch für die Netto-Photosyntheseleistung sichtbar. So zeichnet sich der Berg-Ahorn gegenüber dem Spitz-Ahorn durch eine signifikant höhere Netto-Photosynthese aus. Jedoch finden sich in der zweiten Trockenperiode vom 08.07 bis 14.07.2010 zwischen den beiden Ahornarten wesentlich geringere Unterschiede. Abgesehen vom 02.07.2010 bekräftigen sich somit die hohen Übereinstimmungen auch für die Netto-Photosyntheseleistung von *A. platanoides* mit *A. pseudoplatanus* und von *T. platyphyllos* mit *T. x vulgaris*.

An den Tagen, an denen die Ahornblättrige Platane und die Rot-Eiche mit der Sommer-Linde und der Holländischen Linde, bzw. mit dem Spitz-Ahorn und dem Berg-Ahorn verglichen wurden, zeigen sich wiederum in den meisten Fällen statistisch nachweisbare Unterschiede in der WUE, mit grundsätzlich höheren Werten für die die Ahornblättrige Platane und die Rot-Eiche (Abb. 4.38).

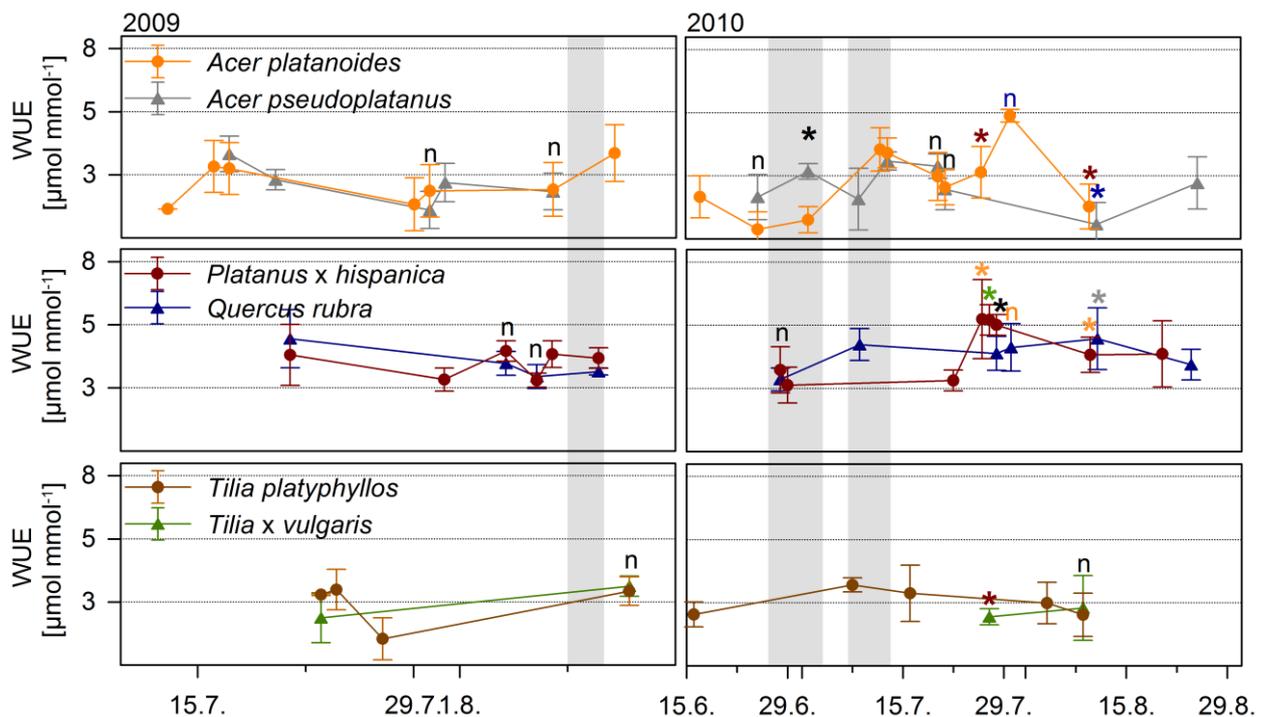


Abbildung 4.38: Effizienz der Wassernutzung (WUE) der Tagesmessungen im saisonalen Vergleich der Jahre 2009 und 2010. Sternchen (*) markieren Parallelmessungen an zwei Arten, die sich in ihrer WUE signifikant unterscheiden und mit (n) gekennzeichnete Messungen als statistisch gleich zu wertende Werte der WUE. Schwarze Symbole verweisen auf einen Vergleich der beiden Arten eines Fensters. Farbige Symbole verweisen auf einen Vergleich mit der in der entsprechenden Farbe markierten Art. Mehrtägige Trockenperioden sind durch grau hinterlegte, vertikale Felder angezeigt.

4.6.3 Vergleich des Gaswechsels während atmosphärischer und edaphischer Trockenheit

Um mögliche Veränderung des Gaswechsels durch mehrtägige Trockenperioden zu erfassen, wurden für das Jahr 2010 jeweils zwei ausgeprägte Perioden mit atmosphärischer und edaphischer Trockenperioden ausgewählt und die physiologischen Parameter zwischen den Arten verglichen.

Während mehrtägiger Lufttrockenheit zeichnen sich eine markante Differenz in der Transpiration und der stomatären Leitfähigkeit zwischen dem Spitz-Ahorn mit besonders niedrigen Werten und den restlichen Arten ab (Tab. 4.14). Hinsichtlich der Netto-Photosynthese und der physiologische Leistungsfähigkeit (WUE) konnten die höchsten

Mediane für *P. x hispanica* und *Q. rubra* berechnet werden. Die Netto-Photosyntheseleistung von *P. x hispanica* und *Q. rubra* hebt sich dabei mit einem Median von 5,66 mmol m⁻²s⁻¹ bzw. 4,29 mmol m⁻²s⁻¹ deutlich von *A. platanoides* mit nur 1,41 mmol m⁻²s⁻¹ ab. Die artspezifische Trennung der WUE ist weniger scharf. Nur zwischen *P. x hispanica* und *Q. rubra* auf der einen Seite und *A. pseudoplatanus* auf der anderen Seite werden signifikante Abweichungen in der Wassernutzungseffizienz unter Lufttrockenheit erkennbar.

Tabelle 4.14: Zusammenfassung der mittleren Werte (Median) der Transpiration (E), der stomatären Leitfähigkeit (g_s), der Netto-Photosynthese (NP) und der Wassernutzungseffizienz (WUE) sowie der dazu ermittelten Standardabweichung für die Messungen während atmosphärischer Trockenheit (VPD > 10 hPa) in der Zeit vom 28.06 bis zum 04.07.2010 und vom 08.07 bis zum 14.07.2010. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Arten auf dem 95%-Signifikanzniveau.

Art	n	E [mmol m ⁻² s ⁻¹]	g _s [mmol m ⁻² s ⁻¹]	NP [mmol m ⁻² s ⁻¹]	WUE [mmol mmol ⁻¹]
<i>A. platanoides</i>	27	0,60 ± 0,29 a	16,60 ± 11,02 a	1,41 ± 1,25 a	2,53 ± 1,26 ab
<i>A. pseudoplatanus</i>	19	1,15 ± 0,46 b	32,60 ± 15,19 ab	2,97 ± 1,49 ac	2,59 ± 0,89 b
<i>P. x hispanica</i>	13	1,37 ± 0,42 b	50,70 ± 14,75 b	5,66 ± 1,28 b	3,61 ± 1,16 a
<i>Q. rubra</i>	8	1,18 ± 0,29 b	34,10 ± 10,69 b	4,29 ± 0,85 bc	3,56 ± 0,78 a
<i>T. platyphyllos</i>	24	1,33 ± 0,37 b	37,30 ± 16,76 b	3,85 ± 1,54 c	2,97 ± 0,89 ab

Für die Bodentrockenheit wurden die Gaswechsellmessungen in den Perioden vom 25.06 bis zum 02.07.2010 und vom 12.07 bis zum 21.07.2010 verglichen, da hier für alle Standorte übereinstimmend die niedrigsten Werte des volumetrischen Bodenwassergehalt (Θ) zu finden waren. Obwohl die statistische Prüfung eher auf ähnliche Werte zwischen den Arten deutet, wurden für einige der physiologischen Parameter artspezifische Unterschiede unter Bodentrockenheit gefunden (Tab. 4.15).

Tabelle 4.15: Zusammenfassung der mittleren Werte (Median) der Transpiration (E), der stomatären Leitfähigkeit (g_s), der Netto-Photosynthese (NP) und der Wassernutzungseffizienz (WUE) sowie der dazu ermittelten Standardabweichung für die Messungen während edaphischer Trockenheit in der Zeit vom 25.06 bis zum 02.07.2010 und vom 12.07 bis zum 21.07.2010. Unterschiedliche Buchstaben markieren signifikante Unterschiede zwischen den Arten auf dem 95%-Signifikanzniveau.

Art	n	E [mmol m ⁻² s ⁻¹]	g _s [mmol m ⁻² s ⁻¹]	NP [mmol m ⁻² s ⁻¹]	WUE [mmol mmol ⁻¹]
<i>A. platanoides</i>		0,67 ± 0,19 a	17,50 ± 4,03 a	1,94 ± 0,78 a	2,54 ± 1,38 a
<i>A. pseudoplatanus</i>		0,98 ± 0,47 ab	23,90 ± 15,82 a	2,42 ± 1,57 a	2,59 ± 0,88 a
<i>P. x hispanica</i>		1,39 ± 0,50 b	39,20 ± 15,81 b	4,94 ± 1,65 b	2,70 ± 0,84 a
<i>Q. rubra</i>		1,18 ± 0,30 ab	31,05 ± 8,01 ab	3,36 ± 1,26 ab	2,86 ± 0,45 a
<i>T. platyphyllos</i>		1,00 ± 0,35 b	33,90 ± 18,04 ab	2,80 ± 1,74 ab	2,87 ± 1,11 a

Dementsprechend transpirieren *P. x hispanica* und *T. platyphyllos* einen signifikant höheren Anteil Wasserdampf als *A. platanoides*. Die stomatäre Leitfähigkeit und die Netto-Photosynthese lassen eine Trennung zwischen der Ahornblättrigen Platane und zwischen den beiden Ahornarten erkennen. Jedoch unterscheiden sich für diese beiden Parameter die Werte

zwischen den Ahornarten, der Rot-Eiche und der Sommer Linde nicht signifikant. Auch die Werte der Platanen, Rot-Eichen und Sommer Linden sind statistisch gleich. Unter Bodentrockenheit zeigen die Arten mit 2,54 bis 2,87 mmol mmol⁻¹ ähnlichen WUE ohne eindeutige artspezifische Differenzen.

4.6.4 Abhängigkeiten des Gaswechsels vom Bodenwasserhaushalt und dem ALVPD

In Tabelle 4.16 sind die Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Abhängigkeit der Gaswechselfmessungen vom volumetrischen Bodenwassergehalt (Θ), vom Bodenmatrixpotential (Ψ_{soil}) und vom ALVPD aufgetragen. Dabei wird deutlich, dass das Air-to-Leaf-Vapor-Pressure-Deficit (ALVPD) am häufigsten signifikant zu den physiologischen Kennziffern korreliert. Einzig für die Transpirationsleistung der Ahornblättrigen Platane und für die WUE der Holländischen Linde konnten nur sehr geringe nicht signifikante Korrelationskoeffizienten von nur -0,10 bzw. -0,20 berechnet werden. Alle Zusammenhänge zum ALVPD sind negativ korreliert und damit können hohe ALVPD-Werte mit geringen Transpiration, stomatären Leitfähigkeit und Netto-Photosynthese sowie einer geringen Effizienz der Wassernutzung assoziiert werden.

Die Prüfung eines Einflusses vom volumetrischen Bodenwassergehalt und vom Bodenmatrixpotential lieferte teilweise widersprüchliche Ergebnisse. So gehen für die Rot-Eiche hohe Netto-Photosyntheseraten mit hohen Werten des volumetrischen Bodenwassergehaltes einher, während für den Berg- und Spitz-Ahorn inverse Beziehungen berechnet wurden (Tab. 4.16). Die stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf (g_s), aber auch die Transpiration der Holländischen Linde sind mit Korrelationskoeffizienten bis zu 0,90 am stärksten durch Θ determiniert.

Zur korrekten Beurteilung der Abhängigkeiten wurden in einem zweiten Schritt einfache lineare Regressionen berechnet und die Zusammenhänge zwischen den abhängigen Variablen des Gaswechsels und den unabhängigen Variablen des Bodenwasserhaushaltes bzw. dem ALVPD in graphischer Form dargestellt (Abb. 4.39 bis 4.43). Die Streudiagramme in Abbildung 4.39 belegen, dass einzig für die Rot-Eichen und die Holländische Linde eine gerichtete Abhängigkeit der Transpiration vom volumetrischen Bodenwassergehalt erkennbar ist. Auch für die stomatären Leitfähigkeiten wird ein ähnlich starker Einfluss von Θ für die Rot-Eiche und auf die Holländische Linde sichtbar. Zusätzlich reagiert der Berg-Ahorn auf der Sachsenwerkstraße in einer Bodentiefe von 60 cm mit einer abnehmenden Leitfähigkeit bei steigendem Bodenwassergehalt. Betrachtet man sich jedoch die Punktwolke auf der die Regressionsgerade basiert (Abb. 4.40) so lässt sich im Gegensatz zu den Zusammenhängen für die Rot-Eichen und die Holländische Linde kaum eine gerichtete Beziehung erkennen. Auch das Bestimmtheitsmaß ist mit $R^2 = 0,21$ nur gering.

Die Werte des volumetrischen Bodenwassergehaltes in den verschiedenen Bodentiefen auf der Krippener Straße liegen sehr eng beieinander (vgl. Abb. 4.29) und dadurch unterscheiden sich auch die Punktwolken je Bodentiefe für die Holländische Linde dieser Straße nur unwesentlich (Abb. 4.39 und Abb. 4.40) und demzufolge R^2 ebenso wenig. Dagegen zeichnet sich Θ auf der Robert-Berndt-Straße durch eine deutliche tiefenabhängige Differenzierung, mit einer stärkeren Streuung bei Tiefen bis 30 cm und geringeren bei 40 cm, 60 cm und 100 cm aus (vgl. Abb. 4.30). Für die Rot-Eiche ist das Bestimmtheitsmaß für die Transpiration in 60 cm Tiefe und für die stomatäre Leitfähigkeit in 40 cm Tiefe für die Relation zum Θ am höchsten.

Tabelle 4.16: Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern der Gaswechsellmessungen und dem ALVPD, des volumetrischen Bodenwassergehaltes (Θ) und dem Bodenmatrixpotential (Ψ_{soil}) in verschiedenen Bodentiefen für die Messungen 2009 und 2010. Fett gedruckte Wert sind signifikant ($P < 0.05$).

	Θ [Vol.%]						Ψ_{soil} [hPa]				ALVPD [Pa kPa ⁻¹]
	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	60 cm	100 cm	20 cm	40 cm	60 cm	80 cm	
Transpiration											
<i>Apl</i> $n =$	0,00	0,12	-0,07	-0,54	0,01	0,11	-0,43	-0,48	-0,15	0,06	-0,64
<i>Aps</i>	-0,32	-0,23	-0,36	-0,07	-0,44	-0,28	-0,36	-0,12	-0,12	-0,18	-0,30
<i>Pxh</i>	-0,13	-0,29	-0,10	-0,09	-0,10	0,04	-0,10	-0,17	0,27	0,10	-0,10
<i>Qru</i>	0,39	0,42	0,47	0,47	0,52	0,50	0,11	0,27	0,22	0,50	-0,61
<i>Tpl</i>	0,07	0,07	0,24	0,17	0,26	0,31	0,20	-0,38	0,32	0,43	-0,38
<i>Txv</i>	0,80	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,39	-0,03	-0,08	-0,18	-0,79
Stomatäre Leitfähigkeit											
<i>Apl</i>	0,03	0,14	-0,03	-0,51	0,00	0,06	-0,41	-0,52	-0,11	0,02	-0,79
<i>Aps</i>	-0,35	-0,24	-0,37	-0,08	-0,45	-0,31	-0,41	-0,21	-0,09	-0,34	-0,58
<i>Pxh</i>	-0,10	-0,00	0,13	0,14	0,13	0,21	-0,05	0,03	0,08	0,08	-0,62
<i>Qru</i>	0,61	0,64	0,68	0,69	0,63	0,48	0,40	0,34	0,41	0,59	-0,87
<i>Tpl</i>	0,23	0,23	0,39	0,32	0,40	0,46	-0,05	-0,19	0,35	0,43	-0,63
<i>Txv</i>	0,86	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,34	-0,11	-0,26	-0,23	-0,92
Netto-Photosynthese											
<i>Apl</i>	0,04	0,12	0,00	-0,37	0,07	0,04	0,02	-0,53	0,04	0,07	-0,69
<i>Aps</i>	-0,50	-0,39	-0,44	-0,15	0,35	-0,38	-0,40	-0,36	-0,26	-0,38	-0,55
<i>Pxh</i>	0,20	0,11	0,22	0,22	0,20	0,16	0,07	0,16	0,03	0,21	-0,53
<i>Qru</i>	0,54	0,58	0,59	0,60	0,48	0,22	0,51	0,54	0,40	0,54	-0,73
<i>Tpl</i>	-0,04	-0,04	0,13	0,07	0,15	0,19	0,08	-0,48	0,23	0,56	-0,41
<i>Txv</i>	0,28	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	-0,12	0,20	0,28	0,28	-0,56
WUE											
<i>Apl</i>	0,04	0,08	0,08	-0,09	-0,10	-0,15	0,23	-0,37	0,05	-0,14	-0,54
<i>Aps</i>	-0,30	-0,20	-0,19	-0,06	-0,16	-0,13	-0,11	-0,28	-0,09	-0,26	-0,59
<i>Pxh</i>	0,53	0,59	0,49	0,50	0,44	0,20	0,30	0,51	-0,25	0,22	-0,66
<i>Qru</i>	0,38	0,42	0,41	0,41	0,19	-0,05	0,44	0,37	0,33	0,07	-0,61
<i>Tpl</i>	-0,12	-0,12	0,04	0,03	0,04	0,04	0,35	0,34	0,08	0,21	-0,30
<i>Txv</i>	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,22	0,41	0,11	0,39	-0,20

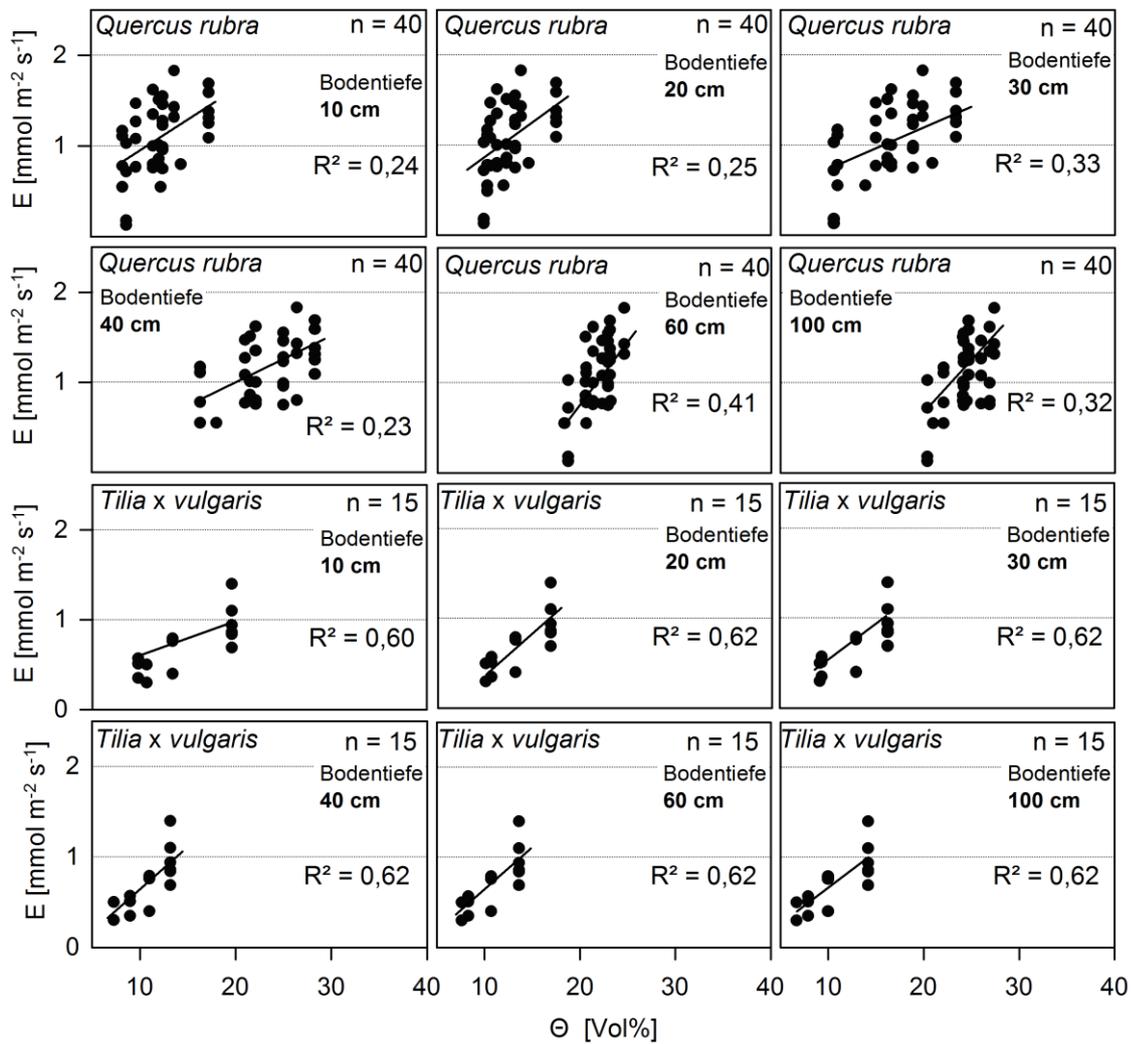


Abbildung 4.39: Signifikante Abhängigkeiten der Transpiration (E) vom volumetrischen Bodenwassergehalt (Θ) mittels einfacher linearer Regression ($P < 0.05$).

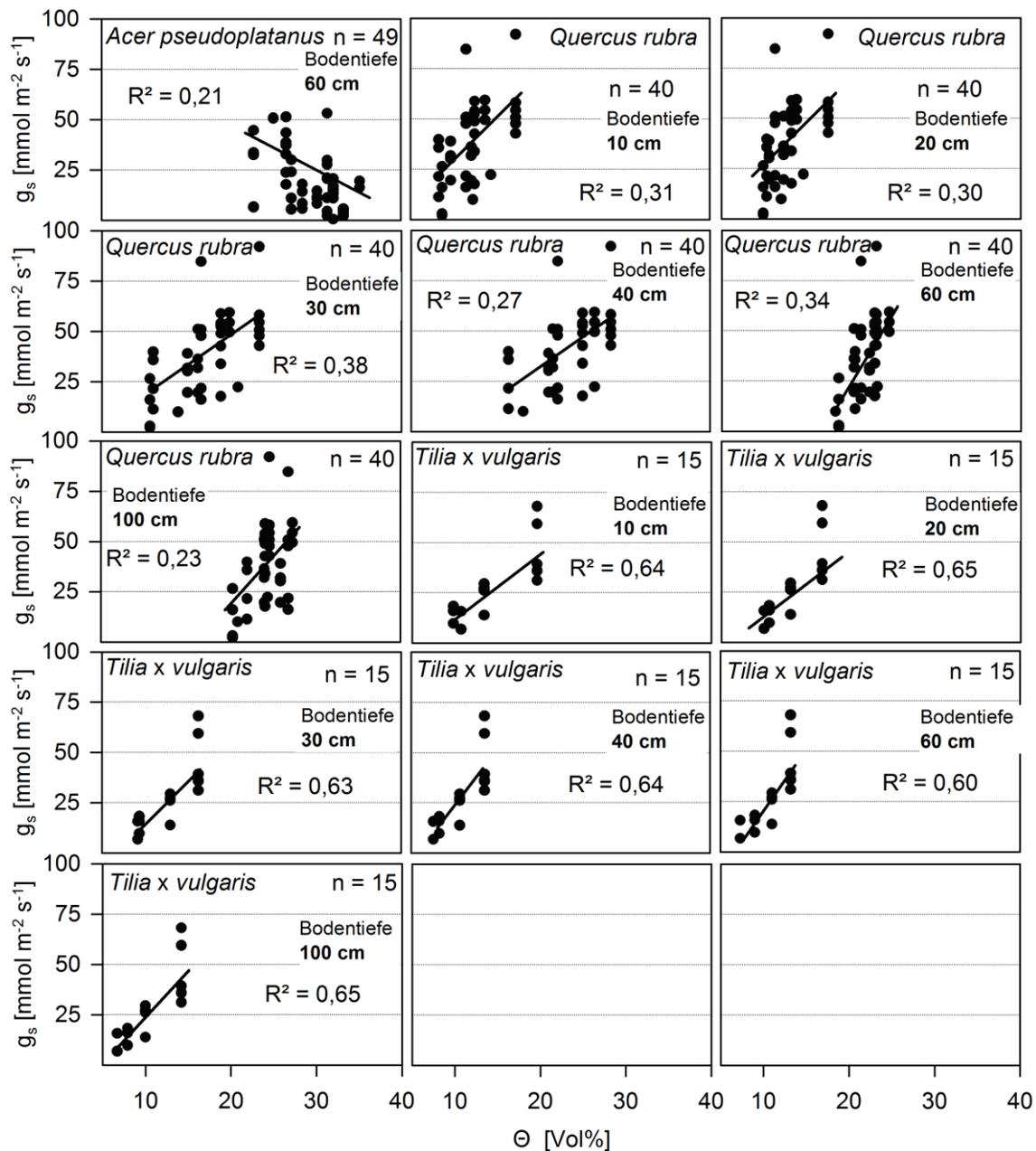


Abbildung 4.40: Signifikante Abhängigkeiten der stomatären Leifähigkeit (g_s) vom volumetrischen Bodenwassergehalt (Θ) mittels einfacher linearer Regression ($P < 0.05$).

Im Folgenden sind die statistisch nachweisbaren Zusammenhänge der Netto-Photosynthese, bzw. der WUE vom volumetrischen Bodenwassergehalt abgebildet (Abb. 4.41). Nur für die Rot-Eiche konnten belegbare Abhängigkeiten der Netto-Photosynthese vom Bodenwassergehalt ermittelt werden. Für jede Bodentiefe von 10 bis 100 cm finden sich hier signifikante Zusammenhänge in Form von linearen Regressionsmodellen.

Eine erklärbare Abhängigkeit der WUE von Θ ist nur für die Ahornblättrige Platane in drei Bodentiefen (30, 40, 60 cm) gegeben.

Insgesamt liegt der Anteil erklärbarer Variabilität der linearen Modelle je nach Bodentiefe für die Beziehungen zwischen der Netto-photosynthese bzw. der WUE und Θ nur zwischen 21 und 34%.

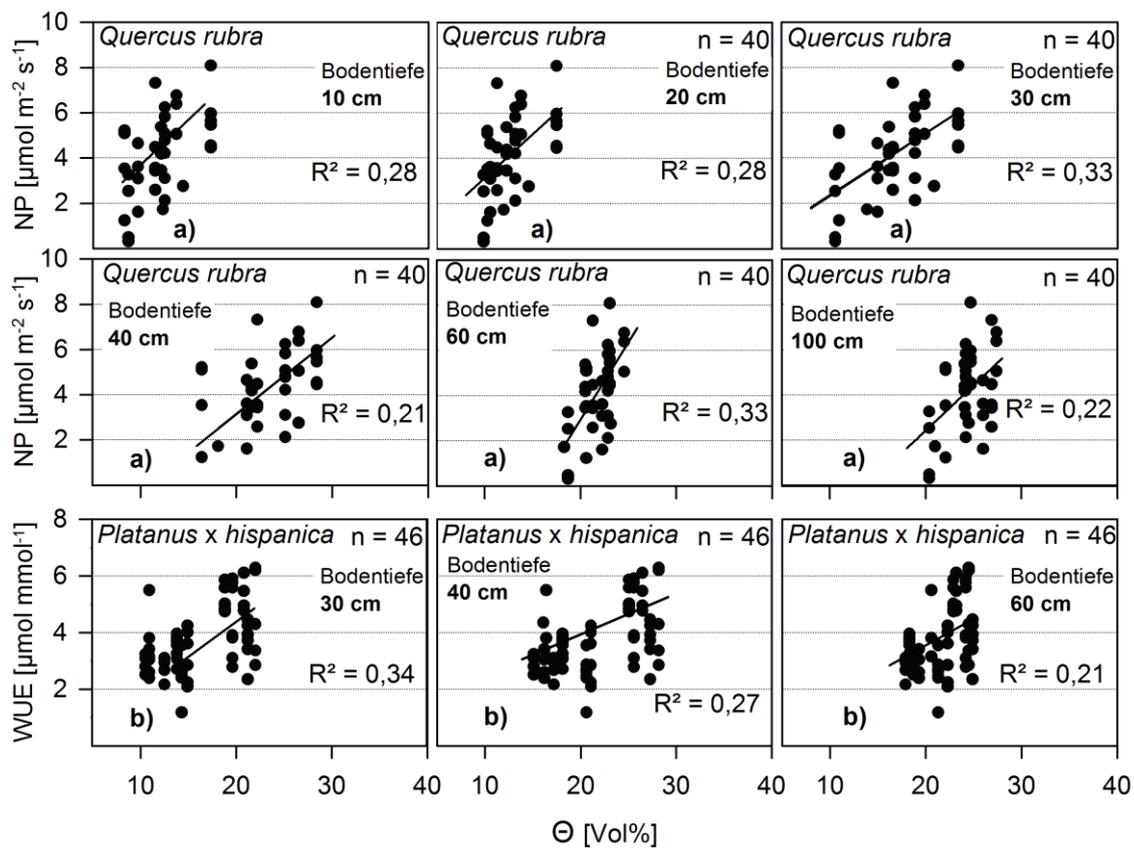


Abbildung 4.41 Abhängigkeit a) der Netto-Photosynthese (NP) und b) der Effizienz der Wassernutzung (WUE) vom volumetrischen Bodenwassergehalt (Θ) mittels einfacher linearer Regression ($P < 0.05$).

Das Bodenmatrixpotential übt sich nur in sechs Fällen eindeutig auf die Variabilität der physiologischen Kennwerte aus (Abb. 4.42). Ein Einfluss des Bodenmatrixpotentials auf die Transpirationsleistung und die stomatäre Leitfähigkeit ist dabei für die Rot-Eichen und die Sommerlinde in einer Bodentiefe von 80 cm, für die Netto-Photosynthese der Rot-Eiche in 80 cm und für die WUE der Ahornblättrigen Platane in 40 cm statistisch nachweisbar.

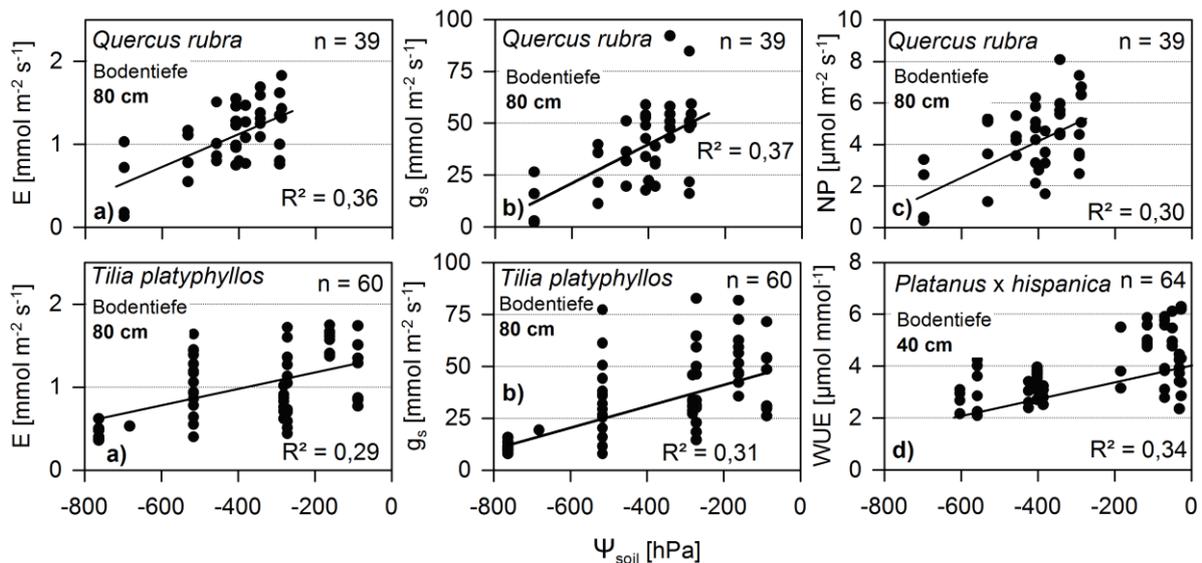


Abbildung 4.42 Signifikante Abhängigkeiten a) der Transpiration (E), b) der stomatären Leitfähigkeit (g_s), c) der Netto-Photosynthese (NP) und d) der Effizienz der Wassernutzung (WUE) vom Bodenmatrixpotential (Ψ_{soil}) mittels einfacher linearer Regression ($P < 0.05$).

In Abbildung 4.43 sind die Ergebnisse für die Regressionsanalysen der Transpiration, der stomatären Leitfähigkeit, der Netto-Photosynthese und der WUE zum ALVPD dargestellt. Im Gegensatz zum Bodenwasserhaushalt wurden deutlich höhere R^2 bis zu 0,74, und mit Ausnahme für die Transpiration des Berg-Ahorns und der Ahornblättrigen Platane stets signifikante Zusammenhänge berechnet. Insgesamt verringern sich die Gasaustauschraten mit steigendem ALVPD. Hohe Werte des ALVPD können mit sehr strahlungsreichen, heißen und trockenen Witterungsbedingungen und dementsprechend einer hohen Differenz zwischen der aktuellen und der maximalen Luftfeuchte und zwischen dem Wasserdampfdruckdefizit der Luft und der Blattoberfläche assoziiert werden.

Im Vergleich der blattphysiologischen Kennwerte, belegen die Ergebnisse für die stomatäre Leitfähigkeit für alle Baumarten eindeutig die stärksten Abhängigkeiten vom ALVPD. Während sich jedoch für die Rot-Eiche 74% der Varianz der stomatären Leitfähigkeit durch das ALVPD ableiten lässt, liegt der Anteil der erklärten Varianz für die Sommer-Linde nur bei 35%. Im Baumartenvergleich konnten wiederum für die signifikanten Regressionsmodelle für die Rot-Eichen die engsten und für die Sommer Linden zumeist geringere Zusammenhänge gefunden werden.

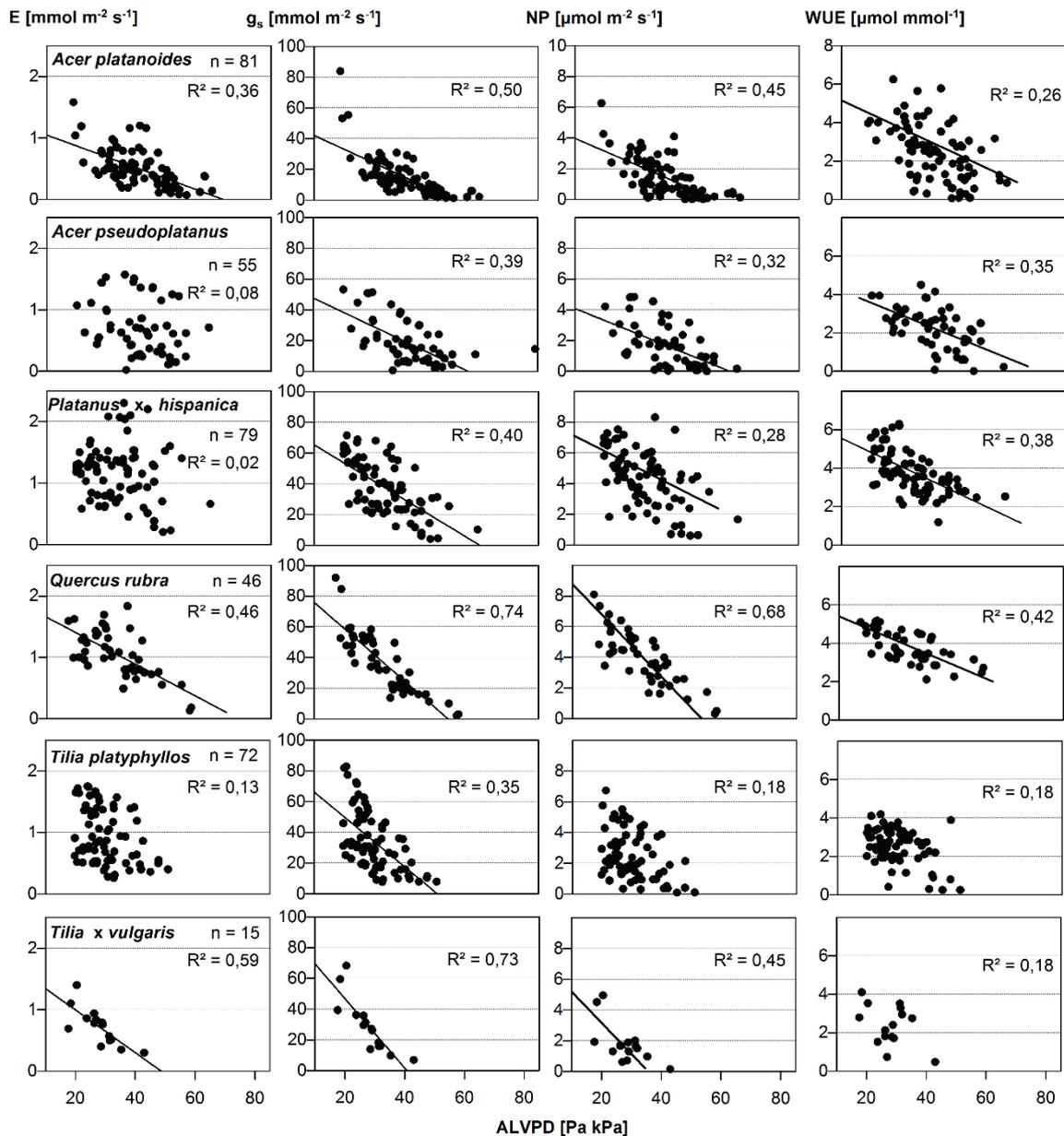


Abbildung 4.43: Ergebnisse für die lineare Regressionsanalysen der Transpiration (E), der stomatären Leitfähigkeit (g_s), der Netto-Photosynthese (NP) und der Effizienz der Wassernutzung (WUE) zum ALVPD. Für Relationen mit $R^2 > 0,2$ wurden die Regressionsgeraden eingezeichnet. Mit Ausnahme für die Transpiration von *A. pseudoplatanus* und *P. x hispanica* sind alle Zusammenhänge signifikant ($P < 0,05$).

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde mittels einer schrittweisen Regression geprüft, welche Variablen oder Variablenkombination die Varianz der Gaswechselfparameter am besten erklärt. In Tabelle 4.17 sind die Ergebnisse anhand von einfachen oder multiplen Regressionsmodellen aufgeführt.

Auch für die schrittweisen Regressionsanalysen bekräftigt sich der starke Einfluss des ALVPD auf den Gaswechsel. Jedoch zeigen sich nach der schrittweisen Variablenselektion auch multiple Regressionsmodelle, die neben dem ALVPD noch das Bodenmatrixpotential,

wie es zum Beispiel für die Sommer-Linde der Fall ist, oder den Bodenwassergehalt beinhalten.

Tabelle 4.17 Ergebnisse für die schrittweisen Regressionsanalysen (Faktoren) und die darauf basierenden multiplen Regressionsmodelle. In der Spalte Faktoren sind die Variablen (F = volumetrischer Bodenwassergehalt, Sp = Bodenmatrixpotential, Zahl = Bodentiefe; ALVPD = Air-to-Leaf-Vapor-Pressure-Deficit) aufgeführt, die in das jeweilige Modell einfließen. F* eine schrittweise Regression war nicht mit allen Bodentiefen gleichzeitig möglich. Alle dargestellten Regressionen sind signifikant ($P < 0,01$)

Transpiration	Faktoren	Intercept	Stdf	FG	R ²	R ² _{adj.}
<i>A. platanooides</i>	ALVPD	1,223685	0,24	79	0,36	0,35
<i>A. pseudoplatanus</i>	-	-	-	-	-	-
<i>P. x hispanica</i>	-	-	-	-	-	-
<i>Q. rubra</i>	ALVPD	1,90540	0,2842	44	0,46	0,45
<i>T. platyphyllos</i>	ALVPD Sp40 Sp80	1,6867547	0,2756	57	0,61	0,59
<i>T. x vulgaris</i>	F20* F30* F40* F60* F80*	0,09451	0,1889	13	0,62	0,59
Stomatäre Leitfähigkeit						
<i>A. platanooides</i>	ALVPD	51,81055	9,227	79	0,50	0,49
<i>A. pseudoplatanus</i>	ALVPD	48,4310	11,96	53	0,39	0,38
<i>P. x hispanica</i>	ALVPD	77,1509	13,46	77	0,41	0,41
<i>Q. rubra</i>	ALVPD	92,85	10,15	44	0,74	0,74
<i>T. platyphyllos</i>	ALVPD Sp40 Sp80	86,9092	11,36	57	0,68	0,67
<i>T. x vulgaris</i>	ALVPD	92,1365	9,471	13	0,73	0,70
Netto-Photosynthese						
<i>A. platanooides</i>	ALVPD	4,01055	0,95	79	0,45	0,45
<i>A. pseudoplatanus</i>	ALVPD	4,11459	1,146	53	0,32	0,29
<i>P. x hispanica</i>	ALVPD	7,74447	1,555	77	0,28	0,27
<i>Q. rubra</i>	ALVPD	8,76266	1,001	44	0,68	0,67
<i>T. platyphyllos</i>	ALVPD Sp40 Sp80	5,6829014	0,9494	57	0,68	0,67
<i>T. x vulgaris</i>	ALVPD	5,52568	1,01	13	0,45	0,40
WUE						
<i>A. platanooides</i>	ALVPD	5,45137	1,265	79	0,26	0,25
<i>A. pseudoplatanus</i>	ALVPD	4,155633	0,8859	53	0,35	0,34
<i>P. x hispanica</i>	ALVPD F10 F20 F30 F60	16,362899	1,362	56	0,50	0,43
<i>Q. rubra</i>	ALVPD	5,531973	0,6297	44	0,42	0,41
<i>T. platyphyllos</i>	ALVPD Sp40	4,4185735	0,8522	58	0,35	0,33
<i>T. x vulgaris</i>	-	-	-	-	-	-

Für die multiplen Regressionsmodelle erhöht sich der Anteil erklärbarer Varianz deutlich und belegt die, wenngleich zum ALVPD geringere, Bedeutung des Bodenwasserhaushaltes auf den Gaswechsel der Sommer-Linden und für die WUE der Ahornblättrigen Platane. In drei Fällen konnte keine der unabhängigen Variablen mittels einer schrittweisen Regression die Varianz der Gaswechselfparameter ausreichend erklären.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Werte des Bodenwassergehaltes zwischen den Bodentiefen war die schrittweise Variablenselektion auf der Krippener Straße nicht mit allen Bodentiefen gleichzeitig möglich. Deshalb wurde immer nur zwei Tiefen gleichzeitig in das schrittweise Modell eingebunden. Je nach Modell wurde hier immer nur eine Bodentiefe selektiert, die aber die gleichen Werte der Steigung, des Bestimmtheitsmaßes und des Signifikanzlevels wie die restlichen Bodentiefen aufwies (vgl. Tab. 4.17, F*). Erstellt man ein multiples Modell mit allen Bodentiefen, ergaben sich niedrigere Bestimmtheitsmaße als für das einfache lineare Modell mit den Datenreihen des Bodenwassergehaltes in nur einer Bodentiefe.

5 Diskussion

In den folgenden Unterkapiteln soll kurz erläutert werden, welche Punkte bei der Interpretation der erzielten Resultate beachtet werden sollten, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Die hier vorgestellte Methodenkritik und die Diskussion der Datenbasis sollen in erster Linie dazu dienen, die nicht-vermeidbaren Schwachstellen aufzuzeigen und in ihrem Ausmaß zu bewerten. Weiterhin werden vor diesem Hintergrund kurz die wichtigsten Ergebnisse der Analysen aufgezeigt und beurteilt.

5.1 Methodenkritik und Datengrundlagen

Die Klimastationen Radebeul-Wahnsdorf (246 m. ü NN) und Dresden-Klotzsche (227 m. ü NN) liegen außerhalb des Dresdner Elbtals und damit annähernd auf gleicher Höhenlage wie der Standort der Waldbäume (197-255 m. ü NN), aber mindestens 90 m höher als die Straßenbaumstandorte in den südöstlichen Stadtgebieten (Niedersedlitz, Leuben, etc.). Aus diesem Grund können die Aufzeichnungen nicht die realen Klimabedingungen der Straßenbaumstandorte abbilden, die nach Ergebnissen von KIRCHNER (1999) im Stadtzentrum bis zu 10 K höher als am Stadtrand liegen können. Damit könnten die Korrelationsanalysen zwischen den Zeitreihen des Radialzuwachses und denen der Temperatur und des Niederschlags für die städtischen Chronologien Ungenauigkeiten enthalten. Trotzdem wurden die Klimazeitreihen aufgrund der geringen Entfernung zu den Standorten und ihrer lückenlosen, langjährigen Zusammensetzung verwendet.

Ein weiterer wichtiger Kritikpunkt betrifft den Stichprobenumfang der städtischen Chronologien. Für 17 Chronologien konnten weniger als 15 Bäume pro Standort und Art zu einer Standortchronologie zusammengefasst werden. Um einen interpretierbaren Informationsgehalt für die Standortschronologien zu erhalten, ist nach SCHWEINGRUBER (1983, 1988, 1996) eine Mindestanzahl von 10 bis 15 Probebäumen erforderlich. FRANK et al. (2009) verweisen sogar auf ein Minimum von 20 Bäumen pro Art, um ein stabiles Signal der Population und verlässliche Aussagen der Zuwachsanalysen zu erhalten. Für die urbanen Standorte konnte diese Vorgabe nicht immer erfüllt werden, da teilweise pro Art und Straße weniger als 10 Bäume zur Verfügung standen. Dadurch ergeben sich grundsätzlich geringere Signalstärken und die Aussagen für die klimatischen Analysen sollten kritisch geprüft werden. Dies trifft im besonderen Maße für die Chronologien der Lindenarten (Sommer-, Winter und Holländische Linde) zu, die teilweise nur EPS-Werte von 0,72 (Winter-Linde, Tronitzer Straße) aufweisen. Im Zusammenhang mit den geringen EPS-Werten sollen hier zwei weitere Aspekte genannt werden, die zu deren Verringerung führen können. Im Gegensatz zu den Waldbäumen ist das Wachstum der Straßenbäume neben den klimatischen Einflüssen, den Auswirkungen von Pflege- und Baumaßnahmen ausgesetzt z.B. Kroneneinkürzungen,

Straßenbauarbeiten, Leitungsverlegungen. Gesetzt dem Fall, dass diese spezifisch urbanen Einflüsse nur für einige Individuen und nicht für das gesamte Kollektiv Auswirkungen hatten, so werden sich durch die Mittelwertbildung bei der Erstellung der Chronologien undeutliche und sich überlagernde Signale ergeben. Dies kann zu geringen EPS-Werten führen, da sich die Wachstumsverläufe und die Varianzen der Einzelbäume (Linden) sehr stark unterscheiden. Die Klima-Zuwachs-Relation der Stadtbäume ist ohne Zweifel durch die vielfältig einwirkenden urbanen Effekte beeinträchtigt. So spielen Schädigungen der Wurzeln durch Straßenbau, Installation von Telefon-, Abwasser-, Trinkwasserleitungen etc., aber auch Streusalzeinträge und Luftverschmutzung für die Vitalität der Straßenbäume eine große Rolle, die sich letztendlich auch auf die Jahrringbildung auswirken (BONN, 2006, MEYER 1982). Deshalb sollten die Jahre nach 1990 und deren klimatische Interpretation besonders aufmerksam verfolgt werden, um einerseits die in diesen Jahren einsetzende starke Bautätigkeit zu berücksichtigen und andererseits der sich verändernden Witterung Rechnung zu tragen. Hinsichtlich der klimatischen Interpretation der Zuwachsdaten könnte die Verwendung von Straßenbäumen zu Problemen und Fehlinterpretationen führen.

Die Bestimmung des Versiegelungsgrades nach BLUME (1993) und der Versiegelungsstufe nach RENGER (1993) können die realen Wachstumsbedingungen des Einzelbaumstandortes nicht wiedergeben. Auch die Ermittlung der mittleren Porosität nach BLUME (1993) ist für eine Beschreibung der konkreten Wachstumssituation des Einzelbaumes unzureichend. Vielmehr bedarf es mehrerer edaphischer Kriterien um diese zu erfassen. Zunächst sollte eine umfassende Beurteilung des Nährstoffangebotes in verschiedenen Horizonten, einschließlich des Salzgehaltes, toxischer Elemente und des pH-Wertes durchgeführt werden, um die Auswirkung der Streusalzbelastung und evtl. vorkommender Nährstoffungleichgewichte auf den Zuwachs zu erfassen. Für die Wachstumsbedingungen von Pflanzen im urbanen Raum müssen an dieser Stelle noch die beiden wichtigen Aspekte der Bodenversiegelung und der Bodenverdichtung genannt werden. Aber auch in diesem Fall wären diese Analysen nur eine Aufnahme der kumulativen Entwicklung der letzten Jahre und könnten die vorangegangene zeitliche Dynamik nicht erfassen. Dagegen geben die Zeitreihen der Bohrkerne Auskunft über Zuwachstrends, die mit schlechten Standortbedingungen einschließlich Nährstoffungleichgewichten, Bodenverdichtung etc. einhergehen.

Für dendroklimatologische Untersuchungen auf Naturstandorten sind Angaben zur Wasserversorgung zumeist auf meteorologische Messdaten zum durchschnittlichen Niederschlagsverlauf oder sogar nur für Jahreszeiträume gemittelt limitiert und nur selten werden Messungen für das konkrete Bodenmatrixpotential und der Bodenfeuchte zu Grunde gelegt. Der urbane Baumstandort ist Teil des städtischen Verdichtungsraumes mit seinen unterirdischem Kanal-

und Abwassersystem. Damit kann ein Einwachsen der Wurzeln in das Kanalisationssystem nicht ausgeschlossen werden, was eine ausreichende oder zumindest bessere Wasserversorgung zu Folge hätte. Dies würde Fehlinterpretation der Klima-Zuwachs Relations nach sich ziehen und zu einem höheren Anteil der Temperatur an der klimatisch erklärbaren Varianz führen. Konkrete Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt z.B. mittels TDR-Sonden sowie Wurzeluntersuchungen wären hier ein Lösungsansatz. Allerdings sollten sich diese Analysen über einen Zeitraum von einem Jahr erstrecken, um die zeitliche Entwicklung verschiedener Standorte vergleichen zu können. Jedoch besteht auch in diesem Fall weiterhin die Problematik, dass die vorgeschlagenen Untersuchungen zur Wurzel und zum Bodenwasserhaushalt allein Daten für einen kurzen Zeitraum lieferten, die nur bedingt für eine Beurteilung der Situation der zurückliegenden Jahrzehnte tauglich ist. Trotzdem sollte dieser Lösungsansatz weiterverfolgt werden, da er die Voraussetzungen für eine Einordnung und einen Vergleich der Standorte schafft.

Je nach Fragestellung ist der Schritt der Trendeliminierung durch verschiedene Methoden und Verfahren möglich. Dabei werden häufig moving splines unterschiedlicher Wellenlängen von 20 bis über 200 Jahre verwendet. Für diese Arbeit wurde eine zweifache Trendeliminierung der Zuwachszeitreihen durchgeführt. Im ersten Schritt wurde eine negative Exponentialfunktion, eine einfache lineare Regressionsgerade oder eine Hegershoff Funktion an die Rohdaten angepasst. Im zweiten Schritt schloss sich eine Bearbeitung mit einer „kubischen Spline“-Funktion von 60 Jahren an. Die Trendeliminierung erfolgte damit auf eine optimale Art, in der sie auf die Länge der Zeitreihen sowie die Varianz der Zuwachskurven abgestimmt wurden. So konnte die mittelfristige dekadische Varianz erhalten und gleichzeitig ein Maximum an klimatischen Informationen aus den Kurven herausgefiltert werden. Trotzdem ist grundsätzlich eine Anpassung von kubischen Splines geringerer Längen möglich, die die kurzfristigen Varianzen noch stärker betonen würden.

Die klimatische Auswertung der indexierten Chronologien ist durch eine Vielzahl von Methoden möglich. Grundsätzlich kommen hierfür Regressions- und Korrelationsanalysen zur Anwendung. Für die hier durchgeführten Berechnungen wurden Korrelationsanalysen angefertigt. Eine Diskussion der Vor- und Nachteile der Anwendungen linearer Regressions- bzw. Korrelationsberechnungen würde hier zu weit führen und ist nicht Ziel dieser Arbeit. Trotzdem soll erwähnt werden, dass die verwendeten Berechnungen mittels der Software Dendroclim zum Standard der heutigen dendroökologischen Methodik gehören. Auch die gewählten Berechnungen zur Ermittlung der Weiserjahre und der Auswirkung sowie Nachwirkung von Trockenjahren wurden nach dem aktuellen Stand der Forschung gewählt.

Für die Beurteilung der Netto-Photosyntheseraten, der Transpirationsraten sowie der daraus abgeleiteten Effizienz der Wassernutzung der sechs Arten wurde der Gaswechsel an vier urbanen Straßenbaumstandorten über die beiden Messjahren 2009 und 2010 erfasst. Die Ergebnisse für die Holländische Linde leiten sich aus den Gaswechsellmessungen von 15 Blättern an jeweils zwei Messtagen pro Jahr ab. Demgegenüber ist der Stichprobenumfang für die restlichen Baumarten deutlich höher und ist mit Messungen an insgesamt 80 Blättern (fünf Tage im Jahr 2009, acht Tage im Jahr 2010) für den Spitzahorn auf der Lilienthalstraße am höchsten. Daher enthalten die errechneten Modelle für die Holländische Linde nur eine geringe Fehlertoleranz.

Die hier verwendeten Zeitreihen des volumetrischen Bodenwassergehaltes und des Bodenmatrixpotentials sind als Basis für die Gegenüberstellung der verschiedenen Standorte völlig ausreichend. Kritisch sollte dagegen die Verwendung der beiden Bodenwasserhaushaltsparameter in ihrer zeitlichen Auflösung für die Korrelations- und Regressionsanalysen zum Gaswechsel betrachtet werden. Um die Ausnutzung des vorhandenen Bodenwassers der Baumarten und damit ihre Anpassung an Trockenheit zu untersuchen, sollten zeitlich höher auflösende und kontinuierlich arbeitende festinstallierte Messgeräte wie z.B. TDR-Sonden mit entsprechenden Datenloggern verwendet werden. Gleichzeitig können damit die tagesperiodische Dynamik und die zum Zeitpunkt der Messung aktuell vorhandenen Bodenmatrixpotentiale und Bodenwassergehalte besser berücksichtigt werden. Die Zeitreihen des Bodenmatrixpotentials weisen zudem speziell bis zu den Bodentiefen bis 40 cm für die lehmigen Standorte (Lilienthalstraße, Sachsenwerkstraße, Robert-Berndt-Straße) häufig Lücken auf, die sich durch ein rasches Austrocknen und damit sehr niedrigen Bodenmatrixpotentials und folglich einem Überschreiten des Messbereichs der Tensiometer erklären lassen. Für eine präzise und kontinuierliche Aufzeichnung des Bodenmatrixpotentials auch bei Werten von unter -700 hPa, sollte hier zukünftig über den Einsatz von Sensoren nachgedacht werden, die auf Basis von Gipsblöcken messen und Potentiale bis - 2000 hPa erfassen können.

Ein Vergleich unterschiedlicher Provenienzen, Arten oder Sorten sollte möglichst unter homogenen Standortsbedingungen durchgeführt werden um das entsprechende Potential, z.B. das Wachstumspotential oder die Effizienz der Wassernutzung vergleichbar zu machen. Für die vorliegende Untersuchung lassen sich die Standortsbedingungen der räumlich unmittelbar angrenzenden Straßenbaumstandorte der Lilienthalstraße, Sachsenwerkstraße und Robert-Berndt-Straße als relativ einheitlich beurteilen. Dies wird durch den zeitlichen Verlauf und die Mediane des volumetrischen Bodenwassergehaltes und Bodenmatrixpotentials in den unterschiedlichen Bodentiefen unterstützt. Dagegen ist der Bodenwassergehalt auf dem sandigen Standort der Krippener Straße für die Holländische Linde und die Sommer-Linde deutlich niedriger und zeigt nur eine geringe Variation über den zeitlichen Verlauf in allen sechs Bodentiefen. Daher lässt sich nicht

ausschließen, dass die gefundenen niedrigen Werte für die Transpiration, Netto-Photosynthese und Effizienz der Wassernutzung der Lindenarten nicht nur art- sondern auch standortbedingt sein.

Um vergleichbare physiologische Ergebnisse zu erhalten, erfolgten die Gaswechselfmessungen unter konstanten Temperatur- und Lichtbedingungen in der Messkammer von 25°C bzw. einer PAR Quantenstromdichte von 1600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$. Trotz einiger bei Freilanduntersuchungen typischen Schwierigkeiten wie Differenzen in den aktuellen atmosphärischen und standörtlichen Bedingungen leiten sich die Ergebnisse, mit Ausnahme der Holländischen Linde, pro Art durch Messungen des Gaswechsels an mindestens 30 Blättern her und erlauben damit repräsentative Schlussfolgerungen.

Für zukünftige ähnlich motivierte Untersuchungen sollte über Messungen unter unterschiedlichen Temperatur- und Feuchtebedingungen nachgedacht werden. Hier ist jedoch die Begrenzung auf zwei oder drei Arten oder eine Erhöhung der Anzahl von Messtagen eine Grundvoraussetzung.

5.2 Kurzdiskussion der dendrochronologischen Ergebnisse

In den folgenden Ausführungen sollen die zu Beginn der Arbeit gestellten Fragen:

- Welche Unterschiede im Reaktionsmuster lassen sich zwischen den Baumarten feststellen?
- Wie wirken sich die unterschiedlichen Standorte bzw. Standortfaktoren (Bodenversiegelung, Stadtstraßenbaum, Baum in städtischer Grünanlage) auf das Wachstumsverhalten und auf den Zuwachs aus?

beantwortet werden. Grundsätzlich zeigen die Stadtbäume verminderte Sensitivitäten, eine hohe Autokorrelation erster Ordnung und eine vergleichbar hohe bis höhere Radialzuwachsleistung als die Waldbäume der Trockenstandorte. Die höheren Zuwachswerte der urbanen Bäume können mit einer besseren Wasserversorgung der Standorte erklärt werden, da die Waldbäume des Borsberges sowie der Kellerbrücke südlich exponierte Hangstandorte sind, während die urbanen Bäume auf Böden mit guter Wasserspeicherkapazität stocken (AHNE & PRAUTSCH, 2008). Die urbanen Straßenbaumstandorte im südöstlichen Teil des Stadtgebietes z.B. die Berchtesgadener Straße, die Peter-Schmoll-Straße oder die Sachsenwerkstraße befinden sich zudem auf ehemaligen Altwasserläufen oder in Talgebieten mit höher anstehendem Grundwasser als die Waldstandorte Borsberghänge und Kellerbrücke (vgl. Tab. 1 und Abb. 1). Auch die Waldstandorte der Rot-Buche Prießnitzwasserfall sowie Friedrichsgrund sind durch eine ausreichend hohe Wasserspeicherkapazität des Bodens gekennzeichnet, was auf die sogenannten Bachtälchenstandorte in schattigen Tallagen zurückzuführen ist.

Die geringen Sensitivitäten und Autokorrelationen der Stadtbäume müssen im Zusammenhang mit der grundsätzlich höheren und beständigen Stressbelastung gesehen werden. Dazu können die speziell urbanen Standortsbedingungen wie Bodenverdichtung (WATSON & KELSEY, 2006), Streusalzbelastung (CEKSTERE et al., 2008, 2010), eine erhöhte Luftverschmutzung (NOWAK et al., 2006), aber auch die bereits erwähnten Eingriffe im Kronenbereich durch Schnittmaßnahmen oder im Wurzelbereich durch Erdarbeiten gezählt werden.

Die Ahornarten Spitz- und Berg-Ahorn zeichnen sich durch hohe Sensitivitäten bei mittleren Autokorrelationswerten aus. Auch die drei urbanen Rot-Buchen und die Kultur-Birnen können in diese Gruppe, also Baumarten mit einer hohen mittleren Sensitivität und mittleren Autokorrelation, eingeordnet werden. Auf der anderen Seite stehen die Eichenarten (Trauben-Eiche und Rot-Eiche) und die Ahornblättrige Platane, die niedrige Sensitivitäten und hohe Autokorrelationswerte aufweisen. Aus den Werten kann für die erste Gruppe ein grundsätzlich hohes „Antworten“ auf exogene Störreinflüsse mit einer geringen Wirkung der Vorjahresbedingungen abgeleitet werden. Dafür hat der Vorjahreseinfluss bei der zweiten Gruppe ein stärkeres Gewicht und das Reaktionsverhalten auf aktuell auftretende positive wie negative Einflüsse ist weniger stark ausgeprägt. Auf diese Weise lässt sich der zweiten Gruppe eine hohe Pufferkapazität zuschreiben, die in einzeln auftretenden Trockenjahren für die langfristige Vitalität von Vorteil ist. Auf der anderen Seite kann diese Gruppe für das Wachstum günstige Witterungsbedingungen einzelner Jahre weniger stark für sich nutzen.

Im Wachstumsvergleich muss neben dem Vergleich der durchschnittlichen mittleren Wachstumsraten, die stark vom Alter der Bäume abhängig sind, der mittelfristige Trend (ein bis vier Dekaden) des Radialzuwachses beurteilt werden. Hier lassen sich stark abnehmende jährliche Radialzuwächse und jährlich geringere Zuwachsleistungen bei den Baumarten Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn, Kultur-Birne, Winter-Linde, Sommer-Linde sowie der Holländischen Linde feststellen. Diese Entwicklung ist mit einer allgemein abnehmenden Vitalität und nachlassendem Adaptationspotential und Regenerationsvermögen verbunden. Dabei sollte das natürliche Altersmaximum, das 100 bis 150 Jahre bei der Kultur-Birne und 200 Jahre beim Spitz-Ahorn umfasst, berücksichtigt werden. Das Alter von zwei Birnen-Chronologien beträgt immerhin schon über 70 bzw. 90 Jahre, was die ermittelten Trends und Zuwachsleistungen hier erklären kann. Dagegen lassen sich der Zuwachstrend und die geringen Zuwachsleistungen aller anderen Chronologien kaum mit den natürlichen Alterstrends (Linde bis 500 Jahre) begründen, so dass die spezifisch städtischen Umweltbedingungen maßgeblich zur Erklärung beitragen müssen. Mit Ausnahme des Spitz-Ahorns auf der Berchtesgadener Straße sowie der Kultur-Birnen auf der Nussallee, können die Standortsbedingungen aller aufgeführten Straßenbäume als typisch urban mit allen Aspekten, die sich negativ auf das pflanzliche Wachstum

auswirken wie eine hohe Bodenversiegelung, geringes Bodenvolumen, eine daraus resultierende hohe sommerliche Hitzebelastung klassifiziert werden (vgl. Kap. 3.2.2). Die Ergebnisse lassen den Rückschluss zu, dass die Baumarten Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn, Winter-Linde, Sommer-Linde sowie Holländischen Linde größere Wachstumsschwierigkeiten als z.B. die Eichenarten im urbanen Umfeld haben. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die EPS-Werte von vier der insgesamt sechs Linden-Chronologien das kritische EPS-Level von 0,85 nicht überschreiten und die Werte zweier Sommer-Linden Chronologien nur knapp darüber liegen. Damit soll verdeutlicht werden, dass die Ergebnisse und folglich auch die Interpretation sowohl der Zuwachs- als auch der Klimaanalysen für die Mehrzahl der Linden-Chronologien eine hohe Unsicherheit aufweisen und weitere Untersuchungen für die Linden unbedingt erforderlich sind. Genau wie für die Ergebnisse der Autokorrelation und der Sensitivität lässt sich durch die Baumarten Ahornblättrige Platane, Rot-Eiche sowie Trauben-Eiche eine weitere Gruppe bilden, die ähnliche Zuwachstrends zeigt. Diese zweite Gruppe zeigt auch in den letzten Dekaden annähernd gleich hohe Zuwachsleistungen und lässt keine stark zurückgehenden Radialzuwächse erkennen. Ausnahmen müssen für die beiden Gruppen der Rot-Eichen der Robert-Berndt-Straße und der jungen Bäume der Stübelallee gemacht werden. Allerdings zeigen die Zuwachskurven, die Altersangaben und die Radialzuwachsleistung, dass sich diese beiden Gruppen in einem Übergang von der Jugendphase in die Adultphase befinden, und die rückläufigen Zuwachstrends durch den Übergang dieser Entwicklungsphasen begründet werden und weniger durch urbane Stressoren. Ein weiteres Indiz für diese Behauptung ist das im Vergleich immer noch sehr hohe Zuwachsniveau dieser beiden Chronologien, das in den letzten fünf Jahren gemittelt immer noch bei über 3 mm jährlichem Radialzuwachs liegt. Dagegen beträgt dieser Wert z.B. für Spitz-Ahorn der Lilienthalstraße nur rund 1,3 mm.

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass sich die Auswahl des städtischen Baumbestandes zunehmend an einer standortspezifischen Eignung ausrichten sollte. Zum einen muss dabei die Toleranz gegenüber den oben erwähnten Aspekten beachtet werden, zum anderen sollten die Pflanzgruben eine ausreichende Größe aufweisen, um eine Wasserspeicherung in längeren Trockenperioden und eine langanhaltend gute Vitalität zu ermöglichen. Als Mindestanforderung gelten für mittel- bis starkwachsende Baumarten 16 m² (z.B. Ahorn) und für schwachwachsende und kleinkronige Arten 12 m² (z.B. Kultur-Birne) Standfläche (FLL 2004, 2005).

- Welchen Einfluss haben langfristige Witterungsereignisse auf die Baumarten?

Für den **Spitz-Ahorn** werden sich die zukünftigen Veränderungen des Klimas, die durch eine Zunahme von Trockenheit und höheren Temperaturen beschrieben werden, weniger negativ auf den Zuwachs auswirken als für den **Berg-Ahorn**. Die Ergebnisse der Analysen ergaben für das Wachstum des Berg-Ahorns einen sehr stark zunehmenden Einfluss der Temperatur im Vorjahres-Juli sowie im aktuellen

Juni und eine starke Abhängigkeit von den Niederschlägen von Mai bis Juli. Dies lässt auf größere Probleme dieser Baumart auf stark versiegelten, hitzebelasteten Standorten schließen. Die klimatischen Analysen für den Spitz-Ahorn ergaben eine zunehmende Auswirkung der Juniniederschläge im aktuellen Jahr und vor allem der Septemberniederschläge des Vorjahres auf das Wachstum. Die SEA zeigen für den Spitz-Ahorn eine deutliche und teilweise signifikante Erholung im zweiten Folgejahr der Trockenheit. Dagegen lassen die Reaktionsmuster des Berg-Ahorns keine signifikanten Abweichungen in und auf die Trockenheit erkennen, was in diesem Fall in Kombination mit den geringen und abnehmenden Zuwachsleistungen eher auf Probleme mit trockenen Bedingungen infolge eines geringen Reaktionspotentials schließen lässt.

Die Standortsbedingungen der **Rot-Buchen** unterscheiden sich sehr stark, so dass auch die klimatischen Untersuchungen des Zuwachses ein standortsabhängig differenziertes Bild zeigen. Trotzdem konnte für die Mehrzahl der Rot-Buchen eine stark zunehmende Korrelation zwischen den Zuwachszeitreihen und den Temperaturen im August/September des Vorjahres sowie von April bis Juli des aktuellen Jahres ermittelt werden. Auf trockenen und urbanen Standorten mit einer starken Hitzebelastung sollte diese Baumart zukünftig daher möglichst nicht angepflanzt werden. Die Weiserjahreanalysen verdeutlichen neben den starken Zuwachsrückgängen in ausgesprochenen Trockenjahren zwar auch eine starke wachstumsfördernde Wirkung von Jahren mit günstigen Witterungsbedingungen. Da diese zukünftig jedoch weniger häufig zu erwarten sind, könnte die Buche mit einer zunehmenden Frequenz an Trockenjahren Probleme mit der langfristigen Vitalität auf urbanen und trockenen Standorten erleiden. Als weiterer Hinweis hierfür kann die höhere Anzahl negativer Weiserjahre für die meisten Chronologien angesehen werden. Auch die SEA belegen deutliche Wachstumsrückgänge in Trockenjahren, die sich vor allem auf dem Trockenstandort noch stark auf den Zuwachs im Folgejahr auswirken.

Die Ergebnisse für die **Ahornblättrige Platane** deuten auf eine ausgezeichnete Eignung für Pflanzungen im stark versiegelten urbanen Bereich unter zunehmender Trockenheit. Die Klima-Zuwachs-Analysen zeigen zwar eine starke Abhängigkeit des Wachstums in Monaten, die für eine Beurteilung anderer Baumarten wie z.B. Berg-Ahorn problematisch zu werten wäre, aber die Klima-Zuwachs Relation bleibt für diese Baumart über die Zeit stabil (vgl. Tab. 8 und Tab. 9). Zudem hat sich der durchschnittliche Radialzuwachs in den letzten 10 Jahren wenig verändert und liegt auf einem hohen Niveau von durchschnittlich über 2,5 mm jährlich. Zwei weitere Aspekte untermauern diese Beurteilung: der geringe Zuwachsrückgang in Jahren mit ausgeprägter Trockenheit sowie die hohe Anzahl von extrem positiven Weiserjahren.

Ebenso wie für die Rot-Buchen, konnten auch für die **Kultur-Birnen** stark abweichende Ergebnisse für die gesamte Klima-Zuwachs-Analysen berechnet werden. Allerdings könnten die Gründe hier auch in

der Altersstruktur der Chronologien, an den häufigen Schnittmaßnahmen für Obstbäume sowie der Fruktifikation liegen. Die geringe Bedeutung der Niederschläge für den Standort Nussallee könnte in Zusammenhang mit einer möglichen Bewässerung der unmittelbar angrenzenden Obstplantagen stehen. Trotz der stark abnehmenden Zuwächse der letzten Jahre, deuten die Ergebnisse auf eine Eignung der Birnen im städtischen Bereich. Belegen ließe sich dies durch die im Laufe der Jahre zunehmende, hier positive Korrelation zu den Temperaturen. Trotzdem sollte bei einer Neuanlage mit Birnbäumen die zeitliche Begrenzung des Wachstumspotentials beachtet werden, die sich infolge der geringen Lebensdauer ergibt.

Für beide Eichenarten der **Trauben-Eiche** und der **Rot-Eiche** deuten die Ergebnisse auf eine ausgezeichnete Eignung für den städtischen Siedlungsraum. Die sich verändernden Relationen der Klima-Zuwachs-Beziehung (moving correlations) können im Zusammenhang mit den steigenden Temperaturen und der Verlängerung der Vegetationsperiode gesehen werden. Besonders hervorzuheben sind hier die starke Zunahme der Niederschlags- und Temperaturwirkung im April für die Rot-Eichen, die für die Trauben-Eichen nicht beobachtet wurden. Für die Zukunft lässt dies auf größere Probleme durch trockene Bedingungen zu Beginn der Vegetationsperiode für die Rot-Eichen schließen. Im Gesamtbild zeigen die gleichbleibend hohen Radialzuwächse und die zwar signifikanten, aber im Vergleich zu den übrigen Baumarten geringen Zuwachsrückgänge in Trockenjahren aber eine sehr gute Eignung für die Anpflanzung auf trockenen Plätzen geringer Bodenvolumina.

Gegenüber den Eichenarten konnte für die **Winter-Linden** auf dem Trockenstandort Borsberghänge ein stark abnehmender Zuwachstrend und den stärksten Rückgang des Radialzuwachses in Trockenjahren festgestellt werden. Damit werden größere Probleme durch trockene Bedingungen als für die Eichen offensichtlich und lassen für diese Baumart eher Gemeinsamkeiten mit den Rot-Buchen des gleichen Standortes erkennen. Auch die zunehmende Abhängigkeit des Wachstums von den April-Temperaturen im aktuellen Jahr sowie von Juli bis August des Vorjahres ist in Kombination mit den stark abnehmenden Radialzuwächsen kritisch zu beurteilen. Die geringen Werte des EPS lassen keine gesicherte Bewertung der Winter-Linden auf dem urbanen Straßenbaumstandort zu. Trotzdem kann aus den Ergebnissen für die Waldbäume eine eher negative Einschätzung für die Verwendung dieser Baumart, das heißt für eine Anpflanzung auf trockenen städtischen Standorten unter einer zusätzlich zunehmenden Hitzebelastung, abgeleitet werden.

Leider lassen auch die Ergebnisse für die **Sommer-Linde** und die **Holländische Linde** keine einheitliche und verallgemeinbare Beurteilung zu. Zwar zeigt die Zuwachsentwicklung für die Chronologie der Sommer-Linden auf der Meußlitzer Straße noch eine hohe Zuwachsleistung bei tendenziell geringen Zuwachsabnahmen. Dieses Ergebnis ist jedoch der Chronologiebildung aus zwei

Kollektiven unterschiedlichen Alters geschuldet. Übereinstimmend für die beiden Standorte der Krippener Straße und der Peter-Schmoll-Straße konnte eine steigende Bedeutung der Juni-Niederschläge beobachtet werden, was unter der Annahme eines künftigen Niederschlagsrückgangs eher nachteilig für das Wachstum ist. Trotzdem ist diese Gemeinsamkeit im klimatischen Reaktionspotential für abschließende Darlegungen zu diesen beiden Baumarten hinsichtlich ihrer Klimasensitivität zu gering.

5.3 Blatt-Wasserpotential

Die Tagesminima der Blatt-Wasserpotentiale in den Jahren 2009 und 2010 für die **Rot-Eichen** und die **Ahornblättrige Platane** lassen sich gut in die zwei unterschiedlichen physiologischen Strategien von Bäumen im Umgang mit Wassermangel einordnen. Dabei können für die Rot-Eiche über den saisonalen Verlauf, wie auch an den Einzeltagen stark negative Tagesminima von bis zu -3,5 MPa beobachtet werden. Diese Reaktion, also ein starkes Absenken der Wasserpotentiale, lässt auf die Strategie einer weitgehenden Trockenstresstoleranz schließen. Demnach können durch ein starkes Absenken der Wasserpotentiale auch stark gebundene Wasservorräte im Boden erschlossen und eine auch in Trockenperioden gleichbleibend hohe Wasserversorgung gewährleistet werden. So bietet ein tieferes Blatt-Wasserpotential bei zunehmender Trockenheit die Möglichkeit, tiefer gelegene Wasserreserven durch ein entsprechend tief reichendes Wurzelwerk zu erschließen (TURNER, 1986). Ein Nachteil für die Strategie der Rot-Eiche ist, dass die hohe Effizienz der hydraulischen Leitfähigkeit des Xylems durch die niedrigen Blatt- und Xylemwasserpotentiale einem hohen Risiko der Emboliebildung in den Gefäßen gegenübersteht.

Dagegen verweisen die eher gleichbleibenden Werte für die Ahornblättrige Platane der Ψ_{\min} von durchschnittlich -2,0 bis maximal -2,5 MPa auf eine Vermeidungsstrategie. Damit kann durch ein rechtzeitiges Schließen der Stomata Wasserstress verhindert werden kann. Gleichzeitig wird das Risiko von Kavitationen der wasserleitenden Xylemgefäße verringert. Auch die Ψ_{\min} von -0,8 bis maximal -2,3 MPa für die beiden Lindenarten, die **Sommer-Linde** und **die Holländische Linde**, lassen eine Strategie zur Vermeidung von Trockenstress erkennen. Jedoch unterscheiden sich die Standortbedingungen hinsichtlich der Nährstoff- und Wasserversorgung für die Lindenarten sehr stark von denen der anderen Baumarten, so dass die Strategie einer Trockenstressvermeidung nur für vergleichbare Standorte gilt.

5.4 Gaswechsel

Im Vergleich der Transpiration und Photosyntheseintensität wurden für die **Ahornblättrige Platane** und die **Rot-Eiche** gleichzeitig eine hohe Transpiration und ein hohes Netto-Photosynthesevermögen gefunden. Für die Ahornblättrige Platane wurden im Verlauf der ersten mehrtägigen Trockenperiode

2010 einzelne Transpirationsraten bis $2,5 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ beobachtet, während die Rot-Eiche in dieser Periode nur bis $1,5 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ Wassermoleküle transpiert. Allerdings ist während der zeitgleichen Messungen das Verhältnis von aufgenommenen CO_2 -Molekülen zu transpierten H_2O -Molekülen statistisch gleich, womit sich die Effizienz der Wassernutzung der beiden Baumarten mit Werten zwischen 3 bis $5 \mu\text{mol mmol}^{-1}$ nicht signifikant unterscheidet.

Während zu Beginn der Trockenperiode am 02.07.2010 für den **Berg-Ahorn** signifikant höhere und auch in der relativ trockenen Periode vom 08.07 bis 14.07.2010 höhere Transpirationsleistungen gefunden wurden, gleichen sich die Raten nach den Trockenperioden wieder an das Niveau des **Spitz-Ahorns** von unter $1 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ an. Dies führt in Kombination mit der Netto-Photosyntheseleistung dazu, dass sich für den Berg-Ahorn während der Parallelmessungen in den Trockenphasen eine höhere WUE zeigt als für den Spitz-Ahorn, sich jedoch die WUE der beiden Arten an den restlichen Tagen nicht signifikant unterscheiden lässt.

LAZARESCU & FIDANOF (1968) untersuchten die Transpirationsverhältnisse von drei Lindenarten in Südromänien und konnten einen starken Einfluss von Sommertrockenheit auf die Transpirationsleistung von **Sommer-Linde** feststellen. Auch für die Sommer-Linden dieser Untersuchung wurde eine höhere Transpirationsintensität bis $1,5 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ bis in die Trockenperioden hinein und eine sich anschließende deutliche Verringerung beobachtet, die sich jedoch anders als bei LAZARESCU & FIDANOF (1968), nach dem Ende der atmosphärischen Trockenperioden kaum wieder erholte und dauerhaft auf einem niedrigerem Niveau von durchschnittlich $1 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ verharrte. Für die Netto-Photosynthese ist eine ähnliche Entwicklung über die Zeit zu beobachten. Eine Erklärung hierfür könnte im geringen Bodenwassergehalt des sandigen Standortes liegen, der sich auch nach den Niederschlägen ab Mitte Juli 2010 nur bis zu einem Wert von knapp 20 Vol.% für Bodentiefen bis 40 cm erhöht und für die tiefer liegenden Schichten dauerhaft noch niedriger ist. Die **Holländische Linde** auf dem gleichen Standort zeigt im Transpirationsverhalten keine signifikanten Unterschiede zur Sommer-Linde und demnach eine vergleichbare Transpirationsleistung. Für diese Baumart wurden jedoch deutlich weniger Messungen durchgeführt, so dass hier vor dem Beginn der mehrtägigen Trockenperioden 2010 keine Aussagen zu einer ähnlich hohen Transpirationsleistung wie bei der Sommer-Linde gemacht werden können.

Für die WUE müssen die Werte in den Trockenperioden besonders berücksichtigt werden. Jedoch wird hier ein Vergleich durch die unterschiedlichen atmosphärischen Bedingungen an den verschiedenen Messtagen erschwert. Trotzdem lässt sich auch für die Trockenperioden zumeist eine höhere WUE für die Ahornblättrige Platane und die Rot-Eiche im Vergleich zu den anderen Baumarten ermitteln.

Im Vergleich des wichtigsten Parameters zur Beschreibung der artspezifischen Trockentoleranz, der Effizienz der Wassernutzung können demnach folgende zwei Gruppen gebildet werden.

1. Arten mit einer hohen Effizienz der Wassernutzung mit Werten von durchschnittlich 3,5 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ und einer auch in Trockenperioden vergleichsweise hohen WUE. Die dieser Gruppe zugeordneten Baumarten zeichnen sich durch eine ausreichend hohe Trockenstressanpassung oder Trockenstresstoleranz aus und können damit auch auf schlecht wasserversorgten Standorten unter den gegenwärtig herrschenden Klimaverhältnissen sommerliche Hitzeperioden gut widerstehen. In diese Gruppen können die **Ahornblättrige Platane (*Platanus x hispanica*)** und die **Rot-Eiche (*Quercus rubra*)** eingeteilt werden
2. Arten mit einer vergleichsweise niedrigeren Effizienz der Wassernutzung mit Werten von deutlich unter 3 $\mu\text{mol}/\text{mmol}$ und einer geringeren WUE in Trockenperioden. Hierzu zählen die vier Baumarten **Spitz-Ahorn (*Acer platanoides*)**, **Berg-Ahorn (*Acer pseudoplatanus*)**, **Sommer-Linde (*Tilia platyphyllos*)** sowie die **Holländische Linde (*Tilia x vulgaris*)**. Für eine dauerhaft hohe Vitalität und der Möglichkeit temporäre Trockenperioden gut zu überstehen, ist die zukünftige Anpflanzung dieser Baumarten nur auf Standorten mit ausreichend hoher Wasserversorgung zu empfehlen.

Für eine Abhängigkeit der Parameter des Gaswechsels vom volumetrischen Bodenwassergehalt sprechen besonders die Ergebnisse für die Rot-Eiche. Dabei konnte z.B. je nach Bodentiefe mittels der einfachen linearen Modelle zwischen 24 und 41% der Varianz der Transpirationsleistung erklärt werden. Obwohl auch die Bodenmatrixpotentiale auf den Gaswechsel der Baumarten einen Einfluss ausüben, konnten nur die Modelle für die Transpiration und die Netto-Photosyntheseleistung von Rot-Eiche und für die Effizienz der Wassernutzung der Ahornblättrigen Platane einen Teil der Varianz erklären.

Abgesehen von zwei Ausnahmen konnte für alle Arten eine Abhängigkeit der Netto-Photosyntheseleistung, der Transpiration und letztendlich der WUE vom ALVPD, das ein Wert für die Differenz zwischen dem Wasserdampf-sättigungsdampfdruck der Luft und dem des Blattes ist, festgestellt werden. Bis auf die Ahornblättrige Platane, für die eine stärkere Abhängigkeit der WUE vom ALVPD und für die Holländische Linde mit einer stärkeren Abhängigkeit der Transpiration vom ALVPD, konnte für alle Baumarten die stärkste Abhängigkeit der Netto-Photosynthese vom ALVPD mit Korrelationskoeffizienten zwischen -0,41 (*Tilia platyphyllos*) bis -0,73 (*Quercus rubra*) berechnet werden. Betrachtet man die Ergebnisse näher, so kann man beispielsweise bei der Ahornblättrigen Platane und der Rot-Eiche bei ALVPD-Werten bis 50 Pa kPa^{-1} eine mehr als doppelt so hohe Netto-Photosyntheserate als bei Spitz- und Berg-Ahorn beobachten. Daraus lässt sich wiederum schlussfolgern, dass die Baumarten Ahornblättrige Platane und Rot-Eiche eine effektivere Netto-Photosynthese im Wertebereich des ALVPD bis 50 Pa kPa^{-1} erzielen.

Letztendlich bestätigen die Ergebnisse für die schrittweisen Regressionen zwar zumeist den stärksten Einfluss des ALVPD auf das physiologische Leistungsvermögen, dennoch wurden in einigen Fällen auch multiple Regressionsmodelle gefunden, die mit Hilfe der unabhängigen Variablen ALVPD und volumetrischem Bodenwassergehalt oder Bodenmatrixpotential die Anteile der erklärbaren Varianz besser berücksichtigen als die Anwendung einfacher linearer Modelle. Demnach ist der Gaswechsel nicht nur an atmosphärische Klimaelemente, sondern auch an Elemente des Bodenwasserhaushaltes gebunden, was dem Model des Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC) entspricht.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlung für die zukünftige Verwendung im urbanen Raum

Um abschließend die zu Beginn gestellte Frage:

- Lassen sich daraus konkrete Empfehlungen oder Ablehnungen für Neupflanzungen im urbanen Raum in Hinblick auf den sich abzeichnenden Klimawandel und die unterschiedlichen Standorte aussprechen?

zu beantworten, werden in der folgenden Tabelle die wichtigsten Erkenntnisse der Arbeit in kurzer Form aufgelistet. Die Angaben zur Spätfrostgefährdung, der Salztoleranz, der Beeinträchtigung durch Fruchtfall sowie der Salztoleranz wurden den Literaturangaben aus ROLOFF & BÄRTELS (2006), SOMMER (2007) sowie MEYER (1982) und WARDA (2001) entnommen. Durch diese Kurzcharakteristik wird noch einmal die gute Eignung für die Ahornblättrige Platane, die Trauben- und Rot-Eiche offensichtlich. Hinsichtlich ihrer Einordnung zur zukünftigen Klimatoleranz auf trockenen Pflanzplätzen wurden eine hohe Trockentoleranz und auch ein ausreichend gutes Wachstum festgestellt. Trotzdem, dass die Kultur-Birnen geringe Radialzuwächse zeigen und eher uneinheitliche Ergebnisse für die Klimasensitivität berechnet wurden, wurde diese Baumart in die Gruppe der geeigneten Baumarten für trockene innerstädtische Pflanzplätze eingeordnet. Diese Klassifizierung lässt sich durch die geringeren Ansprüchen an das Bodenvolumen, an den Platzbedarf sowie durch die Ergebnisse für das klimatische Reaktionspotential herleiten.

Obwohl der Spitz-Ahorn und auch die Winter-Linde herkömmlich als hitze- und trocken tolerant angesehen wurden, lassen die hier berechneten Ergebnisse nur eine Einstufung in mittlere Ränge der Trockentoleranz zu. Auch belegen die Wachstumsentwicklung und die Tendenzen des Klima-Zuwachs-Verhaltens eine Einordnung, die eher für eine mittlere Trockentoleranz spricht.

Die Tauglichkeit einer langanhaltend guten Vitalität auf trockenen Pflanzplätzen ist am fraglichsten bei den Baumarten Berg-Ahorn und Rot-Buche. Für diese beiden Baumarten sollten Pflanzplätze mit ausreichend Bodenvolumen, einer ausreichend hohen Bodenfeuchte sowie einer geringen Hitzebelastung ausgewählt werden. Eine ähnliche Bewertung lassen die Ergebnisse für die Holländische Linde zu.

Tabelle 6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Parameter zur Eignungsempfehlung für die Verwendung im urbanen Raum. Die Bezeichnungen für die verwendeten Abkürzungen finden sich unterhalb der Tabelle.

h.	Tr. Pfl.	Bew. z. Kl.	Spätf.	H. Vers.	R.	Ger. Bodv.	Park	Beein. Fru.	Streu.
<i>Acer platanoides</i> (Spitz-Ahorn)									
< 30	m	m	N	N	m	m	J	N	m
<i>Acer pseudoplatanus</i> (Berg-Ahorn)									
< 30	n g	n g	N	N	h	n g	J	N	N
<i>Fagus sylvatica</i> (Rot-Buche)									
< 40	n g	n g	m	N	h	n g	J	m	N
<i>Platanus x hispanica</i> (Ahornblättrige Platane)									
< 35	g	g	N	J	h	m	J	N	J
<i>Pyrus communis</i> (Kultur-Birne)									
< 15	g	g	m	J	ger	g	J	J	m
<i>Quercus robur</i> subsp. <i>sessiliflora</i> (Trauben-Eiche)									
< 30	g	g	J	J	h	m	J	m	J
<i>Quercus rubra</i> (Rot-Eiche)									
< 25	g	g	m	J	h	J	J	m	J
<i>Tilia cordata</i> (Winter-Linde)									
< 40	m	n g	N	N	h	m	J	m	N
<i>Tilia platyphyllos</i> (Sommer-Linde)									
< 40	n g	n g	N	N	h	n g	J	m	N
<i>Tilia x vulgaris</i> (Holländische Linde)									
< 40	m	n g	N	N	h	n g	J	m	N

- h = Höhe [m]
 Tr. Pfl. = Trockene Pflanzplätze
 Bew. z. Kl. = Bewertung der zukünftigen Klimatoleranz (zunehmende Hitze, abnehmende Niederschläge) auf heute schon ungünstigen Pflanzplätzen für die Art
 Spätf. = Spätfrostgefährdet
 h. Vers. = hohe Versiegelung des Pflanzstandortes
 R. = Raumbedarf der Art (weitausladende Äste)
 Ger. Bodv. = Geringes Bodenvolumen
 Park = Pflanzstandort Park
 Beein. Fru. = Beeinträchtigung durch Fruchtfall
 Streu. = streusalztolerant

Bewertung

g	= geeignet
m	= mittel
h	= Hoch
ger	= gering
n g	= nicht geeignet
N	= Nein
J	= Ja

Auch für den ökophysiologischen Teil bestätigen sich die bereits gefundenen Ergebnisse, dass die Ahornblättrige Platane und die Rot-Eiche unter trockenen Witterungsbedingungen ein höheres Leistungsvermögen besitzen. So transpirieren die Baumarten Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn sowie die Holländische Linde und die Sommer-Linde für die Aufnahme einer äquivalenten Menge an CO₂ deutlich mehr H₂O als die beiden Baumarten der Ahornblättrigen Platane und der Rot-Eiche. Damit lässt sich schlussfolgern, dass die erstgenannten Baumarten in Trockenperioden verstärkt mit Problemen durch Wassermangel zu leiden haben, während die Ahornblättrigen Platane und die Rot-Eiche eine bis zu 1,5 mal höhere Effizienz der Wassernutzung besitzen.

Eine weitere wichtige Erkenntnis wurde durch die Erfassung der Tagesminima des Blatt-Wasserpotentials gefunden. Hier zeigen die beiden als trockentolerant eingestuften Baumarten, die Ahornblättrige Platane und die Rot-Eiche, eine unterschiedliche Strategie im Umgang mit Wassermangel. Während die Daten für die Ahornblättrige Platane eher auf eine Strategie einer Trockenstressvermeidung deuten, die mit einer Reduktion der Transpiration einhergehen, verweisen die niedrigen Werte der Blatt-Wasserpotentiale für die Rot-Eiche auf eine Strategie der Trockenstresstoleranz. Damit kann die Rot-Eiche auch stark gebundenes Wasser im Boden und Wasser aus tief liegenden Bodenschichten erschließen. Auch die Abhängigkeiten des Gaswechsels der Rot-Eichen vom Bodenwassergehalt und des Bodenmatrixpotentials unterstreichen diese Schlussfolgerung. Letztendlich führen beide unterschiedlichen Strategien zu einer Reduktion von Trockenstress. Für die Lindenarten, die Holländische Linde und die Sommer-Linde, wurden ähnlich hohe Minima der Blatt-Wasserpotentiale ermittelt, die ebenso wie für die Ahornblättrigen Platane für eine Strategie der Trockenstressvermeidung sprechen.

Damit sind generell alle untersuchten Baumarten für weitere Anpflanzungen im städtischen Bereich unter der Bedingung einer optimalen Standortwahl zu empfehlen. Auch wenn einige Baumarten für eine Verwendung auf Pflanzplätzen extremer Hitze- und Trockenbelastung ungeeignet sind, so ist eine Anpflanzung der untersuchten Arten in Parks und Gärten mit günstigeren Wachstumsbedingungen möglich.

7 Literatur

- AFFOLTER, N. P (2007): Aufbau eines Tieflagen- Jahrringnetzwerkes im Rhonetal, Wallis und seine klimatische Analyse. Diplomarbeit, Universität Bern, 85 S.
- AHNE, P. & PRAUTSCH, E (2008): Straßenbaumkonzept der Stadt Dresden. Diplomarbeit, Institut für Landschaftsarchitektur – Lehrgebiet Landschaftsplanung. Technische Universität Dresden, 109 S.
- BAILLE, M.G.L. & PILCHER, J.R (1973): A simple crossdating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33, 7-14
- BERNHOFER, C. (2007): Stadtklima – Klimaänderung: Was ist zu erwarten? In: DUJESIEFKEN, D., KOCKERBECK, P. (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2007*. Haymarket Media, Braunschweig, 157-168.
- BERNHOFER, C., MATSCHULLAT J., BOBETH, A (Hrsg.) (2009): Das Klima in der REGKLAM-Modelregion Dresden. *Regklam Publikationsreihe Heft 1*. Rhombos, Berlin, 117 S.
- BEST, D.J. & ROBERTS, D.E (1975): Algorithm AS 89: The Upper Tail Probabilities of Spearman's rho. *Applied Statistics* 24, 377-379
- BIONDI, F. & WAIKUL, K (2004): DENDROCLIM2002: A C ++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computers & Geosciences* 30, 303-311
- BLUME, H.-P (1993): Böden. In: SUKOPP, H. & WITTIG, R.: *Stadtökologie*. Fischer, Stuttgart, Jena, New York. 154-171
- BLUME, H.-P (2000): Böden städtisch-industrieller Verdichtungsräume. In: BLUME H.-P., FELIX-HENNINGSEN, P., FISCHER, W.R., FREDE, H.G., HORN, R., STAHR K.: *Handbuch der Bodenkunde*. (Hrsg). Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg, 154-171
- BONN, S (1998): Dendroökologische Untersuchung der Konkurrenzdynamik in Buchen/Eichen-Mischbeständen und zu erwartende Modifikationen durch Klimaänderungen. *Forstw. Beitr. Tharandt/Contrib. For. Sc.* 3, 226 S.
- BONN, S (2006): Jahrringe als Indikator für Schadereignisse und als Archiv der Baumlebensgeschichte von Stadtbäumen. *Forst und Holz* 61, 366-368
- BRÄKER O.U (1981): Der Alterstrend der Jahrringdichten und Jahrringbreiten von Nadelhölzern und sein Ausgleich. *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien* 142, 75-102
- BUNN, A.G (2008): A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26, 115-124
- CEKSTERE, G., NIKODEMUS, O., OSVALDE, A (2008): Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga, Latvia. *Urban Forestry & Urban Greening* 7, 207-217
- CEKSTERE, G., OSVALDE A., NIKODEMUS, O (2010): Influence of De-Icing Salt on K Supply and Street Trees Ecological Status in Riga, Latvia. *Highway and Urban Environment Alliance for Global Sustainability Bookseries* 17, 337-345
- COOK E.R. & PETERS K (1997): Calculating unbiased tree-ring indices for the study of climatic and environmental change. *The Holocene* 7, 361-370
- COOK, E.R. & BRIFFA, K (1990): Data Analysis. In: Cook, E. R. & Kairiukstis, L. A. (Eds.): *Methods of dendrochronology. Applications in the environmental science*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 97-162

- COOK, E.R (1985): A time series approach to tree ring standardization. Diss. Universität Arizona, Tucson, Arizona USA, 183 S.
- COOK, E.R., BRIFFA, K., SHIYATOV, S., MAZEPA, V (1990): Tree-ring standardization and growth-trend estimation. In: COOK, E. R. & KAIRIUKSTIS, L. A. (Eds.): Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 104-123
- CROPPER, J.P (1979): Tree-ring skeleton plotting by computer. Tree-Ring Bulletin 39, 47-59
- ECKSTEIN, D. & BAUCH, J (1969): Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. Forstwiss. Centralbl. 88, 230-250
- ERBE, S (2002): Untersuchungen zur räumlichen Verteilung und zum Trend korrigierter Niederschläge in Sachsen im Zeitraum 1971-2000. Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Geographie, 65 S.
- ESPER J., BÜNTGEN U., FRANK D.C., NIEVERGELT D., LIEBHOLD A (2007): 1200 years of regular outbreaks in alpine insect. Proceedings of the Royal Society B 274, 671-679
- FIELD, C (1983): Allocating leaf nitrogen for the maximisation of carbon gain: leaf age as a control on the allocation programme. Oecologia 56, 341-347
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.) (2005): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. Hrsg.: Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V. (FLL), Bonn
- FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.) (2004): Empfehlungen für Baumpflanzungen. Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL), Bonn.
- FRANK, D.C., BÜNTGEN, U., ESPER, J (2009): Comment on "Late 20th century growth acceleration in Greek firs (*Abies cephalonica*) from Cephalonica Island, Greece: A CO₂ fertilization effect?"", Dendrochronologia 27, 223-227
- FRANKE, J., GOLDBERG, V., EICHELHANN, U., FREYDANK, E., BERNHOFER, C (2004): Statistical analysis of regional climate trends in Saxony, Germany. Climate Research 27, 145-150
- FRANKE, J., SURKE, M., LANGROCK, M (2007): Handbuch zur „Klimadatenbank Mitteldeutschland“. Unveröffentlichtes Handbuch, TU Dresden, Professur Meteorologie, Tharandt.
- FRICKER J.M., CHEN, H.Y.H., WANG, J.R (2006): Stand age structural dynamics of North American boreal forests and implications for forest management. International Forestry Review 8, 395-405
- FRITTS, H.C (1976): Tree-rings and climate. Academic press, London, New York, San Francisco, 567 S.
- FRITTS, H.C (1991): Reconstructing Large-scale Climatic Patterns from Tree-Ring Data. The University of Arizona Press, Tucson, London, 286 S.
- GRISSINO-MAYER, H.D (2001): Evaluating crossdating accuracy: A manual and tutorial for the computer program COFECHA. Tree-Ring-Research 57, 205-221
- GRISSINO-MAYER, H.D., HOLMES, R.L., FRITTS, H.C (1996): The international tree-ring data bank. Program library version 2.0 user's manual. Tucson, USA, 106 S.
- GUTSCHICK, V.P (1999): Biotic and abiotic consequences of differences in leaf structure. New Phytol. 143, 3-18

- HARDIN, P.J. & JENSEN, R.R (2007): The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study. *Urban Forestry & Urban Greening* 6, 63-72
- HAURWITZ, M.W. & BRIER, G.W (1981): A critique of the superposed epoch analysis method: its application to solar-weather relations. *Mon. Weather Rev.* 109, 2074-2079
- HOLLSTEIN, E (1980): Mitteleuropäische Eichenchronologie. *Trierer Grabungen und Forschungen* 11, 273 S.
- HOLMES, R.L., ADAMS, R.K., FRITTS, H.C (1986): Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN, Chronology Series VI. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, Arizona
- KIRCHNER, B (1999): Planungsrelevante Ergebnisse zum Stadtklima von Dresden sowie Erfahrungen zum Stadtklima von Dresden sowie Erfahrungen bei der Nutzung. *Wiss. Mitt. Inst. Meteorol. Univ. Leipzig u. Inst. für Troposphärenforschg. Leipzig* 13, 126-141
- KOIDE, R.T., ROBICHAUX, R.H., MORSE, S.R., SMITH, C.M (1989): Plant water status, hydraulic resistance and capacitance. In: PEARCY, R.W., EHLERINGER, J.R., MOONEY, H.A., RUNDEL, P.W (eds): *Plant Physiological Ecology - field methods and instrumentation*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 161-183
- KRAMER, H. & AKÇA, A (2002): Leitfaden zur Waldmesslehre. Frankfurt am Main, Sauerländers, 266 S.
- LAFORTEZZA, R., CARRUS, G., SANESI, G., DAVIES, C (2009): Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress. *Urban Forestry & Urban Greening* 8, 97-108
- LANDESHAUPTSTADT DRESDEN (Hrsg.) (1993): Umweltbericht 1993. Amt für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Dezernat Umwelt. Dresden, 139 S.
- LARCHER, W (2001): Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Stressbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. Ulmer, Stuttgart, 408 S.
- LAZARESCU, D. & FIDANOF, F (1968): Forschungen in Bezug auf die Verdunstung bei der Linde. *Cercetari privind traspiratia la tei. Revista Padurilor* 10, 515-518
- LOUGH, J.M. & FRITTS, H.C (1987): An assessment of the possible effects of volcanic eruptions on North American climate using tree-ring data, 1602 to 1900 A.D. *Clim. Change* 10, 219-239
- MÄKINEN, H. & VANNINEN, P (1999): Effect of sample selection on the environmental signal derived from tree-ring series", *Forest Ecology and Management* 113, 83-89
- MCPHERSON E.G. & SIMPSON, J.R (2002): A comparison of municipal forest benefits and costs in Modesto and Santa Monica, California, USA. *Urban Forestry & Urban Greening* 1, 61-74
- MEYER, F.H (Hrsg.) (1982): Bäume in der Stadt. 2. Aufl. Ulmer, Stuttgart, 380 S.
- MORECROFT, M.D. & ROBERTS J (1999): Photosynthesis and stomatal conductance of mature canopy oak (*Quercus robur*) and sycamore (*Acer pseudoplatanus*) trees throughout the growing season. *Funct. Ecol.* 13, 332-342
- MORECROFT, M.D., STOKES V.J., MORISON J.I.L (2003): Seasonal changes in the photosynthetic capacity of canopy oak (*Quercus robur*) leaves: the impact of slow development on annual carbon uptake. *Int. J. Biometeorol.* 47, 221-226

- MORISON, J.I.L., BAKER N.R., MULLINEAUX P.M., DAVIES W.J (2008): Improving water use in crop production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 363, 639-658
- NEUMANN, U (2001): Zusammenhang von Witterungsgeschehen und Zuwachsverläufen in Fichtenbeständen des Osterzgebirges. *Forstw. Beitr. Tharandt/Contrib. For. Sc.* 11, 193 S.
- NEUWIRTH, B (2004): Interannuelle Klima/Wachstums-Beziehungen zentraleuropäischer Bäume von AD 1901 bis 1971. Eine dendroklimatologische Netzwerkanalyse. Dissertation. Universität Bonn, 165 S.
- NEUWIRTH, B., SCHWEINGRUBER, F.H., WINIGER, M (2007): Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia* 24, 79-89
- NOWAK, D.J., CRANE, D.E., STEVENS, J.C (2006): Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4, 115-123
- ORWIG, D.A. & ABRAMS, M.D (1997): Variation in radial growth responses to drought among species, site, and canopy strata. *Trees* 11, 474-484
- PRETZSCH, H (1999): Waldwachstum im Wandel. *Forstw. Cbl.* 118, 228-250
- PRETZSCH, H. & UTSCHIG, H (1989): „Zuwachstrend-Verfahren“ für die Abschätzung krankheitsbedingter Zuwachsverluste auf den Fichten- und Kiefernweiserflächen in den bayerischen Schadgebieten. *Forstarchiv* 60, 188-193
- PRETZSCH, H (2002): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. Parey, Berlin, 414 S.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2008): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- RENGER, M (1993): Bodenwasser- und Grundwasserhaushalt. In: Sukopp, H. & Wittig, R.: *Stadtökologie*, Fischer, Stuttgart, Jena, New York, 172-182
- RICHTER, D (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194, Eigenverlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M.
- RIGLING, A. & CHERUBINI, P (1999): Wieso sterben die Waldföhren im „Telwald“ bei Visp? Eine Zusammenfassung bisheriger Studien und eine dendroökologische Untersuchung. *Schweizer. Zeitschr. Forstwes.* 150, 113-131
- ROLOFF, A. & BÄRTELS, A (2008): *Flora der Gehölze – Bestimmung, Eigenschaften, Verwendung*. 3. Aufl. Ulmer, Stuttgart, 853 S.
- ROLOFF, A (2001): *Baumkronen – Verständnis und praktische Bedeutung eines komplexen Naturphänomens*. Ulmer, Stuttgart, 178 S.
- SACHS, L. & HEDDERICH, J (2006): *Angewandte Statistik. Methodensammlung in R*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 702 S.
- SANDER, C (2004): Innovations in computer based tree-ring analysis programs (abstracts). In: TRACE 2004 Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, 22-24 April 2004, Swiss Federal Research Institute, WSL, Birmensdorf, Switzerland.
- SCHOLANDER, P.F., HAMMEL, H.T., BRADSTREET, E. D, HEMMINGSEN, E.A (1965): Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339-346
- SCHWEINGRUBER, F.H (1983): *Der Jahrring: Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Haupt, Bern, Stuttgart, 234 S.

- SCHWEINGRUBER, F.H (1988): Tree rings. Basics and applications of dendrochronology. Reidel, Dordrecht, 276 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H (1996): Tree rings and environment. Dendroecology. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Haupt, Bern, Stuttgart, Vienna, 609 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H (2001): Dendroökologische Holzanatomie: Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Bern, Stuttgart, Wien: Paul Haupt, 472 S.
- 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, pp. 9-38.
- SHAPIRO S.S. & WILK M.B (1965): An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika* 52, 591-611.
- SOMMER, N. (2007): Gehölzsortimente und ihre Verwendung. BdB-Handbuch. Österreichischer Agrarverlag, Wien, 144 S.
- STEIGER, J.H. (1980): Tests for comparing elements of a correlation matrix, *Psychological Bulletin* 87, 245-251
- STOKES V.J., MORECROFT M.D., MORISON J.I.L (2010): Comparison of leaf water use efficiency of oak and sycamore in the canopy over two growing seasons. *Trees - Structure and Function* 24, 297-306
- STOKES, M.A. & SMILEY, T. L (1996): An introduction to tree-ring dating. The University of Arizona Press, Tucson, London, 73 S.
- TURNER, N.C (1986): Adaption to water deficits: a changing perspective. *Australian Journal of Plant Physiology* 13, 175-190
- VAN, D.S., BRIFFA, K.R., JONES, P.D., OSBORN, T.J (2006): Summer Moisture Variability across Europe. *Journal of Climate*, 19, 2818-2834
- VON CAEMMERER, S. & FARQUHAR, G.D (1981): Some relationships between the biochemistry of photosynthesis and the gas exchange of leaves. *Planta* 153, 376-387.
- VON WILLERT, D., MATYSSEK R., HERPICH W (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Grundlagen und Anwendungen. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York. 344 S.
- WARDA, H.-D (2001): Das große Buch der Garten- und Landschaftsgehölze. Bad Zwischenahn: Bruns Pflanzen, 935 S.
- WATSON, G.W. & KELSEY, P. (2006): The impact of soil compaction on soil aeration and fine root density of *Quercus palustris*. *Urban Forestry & Urban Greening* 4, 69-74
- WELLS, N., GODDARD, S., HAYES, M.J (2004): A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index. *Journal of Climate* 17, 2335-2351
- WENK, G. & VOGEL, M (1995): Einfluss von Temperatur, Wasserhaushalt, Strahlung und Stoffeinträgen auf das Durchmesserwachstum von Fichten im Erzgebirge und Untersuchungen über Struktur und Dynamik des Wachstums von Mischbeständen. In: TU Dresden, Fachrichtung Forstwissenschaften (Hrsg.): Untersuchung von Waldökosystemen im Erzgebirge als Grundlage für einen ökologisch begründeten Waldumbau, 104-114
- 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

ZACH A., HORNA V., LEUSCHNER C (2010): Diverging temperature response of tree stem CO₂ release under dry and wet season conditions in a tropical montane moist forest. *Trees - Structure and Function* 24, 285-296

8 Anhang

Tabelle 8.1 Übersicht für die Untersuchungsflächen im Raum Dresden Pillnitz (Quelle: Forstamt

Neustadt)

Wuchsgebiet	Westlausitzer Platte und Elbtalzone
Wuchsbezirk	Dresdner Elbtalweitung
Forstbezirk	Neustadt
Revier	Fischbach
forstliche Klimastufe	Ut (untere Berglagen und Hügelland mit trockenem Klima)
Klima (1961 – 1990)	9,2 °C Jahresmitteltemperatur, 650 mm Jahresniederschlag
Probefläche Borsberghänge	
Abteilungen	512a ⁰ ; 514a ¹ , a ² ; 515a ¹ , a ² ; 516a ¹ , a ²
Höhe über NN	180 – 220 m
Gelände	Mulde, Mittelhang, Oberhang; stark geneigt bis schroff
Exposition	Süd bis Südwest
Inklination	25 – 30°
Bodenfeuchte	Steilhang-Komplexstandort: trocken
Nährkraft	mäßig - mittel
Boden	Braunerde
potentielle nat. Waldges.	Eichen-Hainbuchenwald, Steilhangkomplexstandort
Baumarten	Gemeine Kiefer, Trauben-Eiche, Gewöhnliche Hainbuche, Sand-Birke, Rot-Buche, Winter-Linde, Rot-Eiche, Gemeine Robinie
Entstehung	Naturverjüngung
Vorbestand	unbekannt
Oberhöhe m	GKI 28, TE 24, HBU 38, GBI 17, RBU 27, WLI 27, REI 25, ROB 25
Oberdurchmesser cm	GKI 43, TE 44, HBU 23, GBI 22, RBU 63, WLI 45, REI 49, ROB 35
Alter a (Höchstalter)	GKI 169, TE 140, HBU 160, GBI 60, RBU 200, WLI 110, REI 110, ROB 110
Probefläche Friedrichsgrund	
Abteilung	502a ¹ ; 503a ¹ ; 506a ² ; 507a ² ; 508a ³
Höhe über NN	210 – 270 m
Gelände	Bachgrund, Hang; eben, steil bis schroff,
Exposition	502a ¹ ; 503a ¹ : Süd bis West; 506a ² ; 507a ² ; 508a ³ : Nord bis West
Inklination	10 – 30°
Bodenfeuchte	Steilhang-Komplexstandort: mäßig frisch- frisch; terrestrischer Standort: mäßig frisch
Nährkraft	mittel - kräftig
Boden	Braunerde, Auenlehm, podsolige Braunerde,
potentielle nat. Waldges.	Ahorn-Eschen-Schluchtwald, Steilhangkomplexstandort
Baumarten	Rot-Buche, Winter-Linde, Gemeine Kiefer, Stiel-Eiche, Trauben-Eiche, Gewöhnliche Hainbuche, Gemeine Fichte, Berg-Ahorn, Spitz-Ahorn
Entstehung	Kunst/Naturverjüngung
Vorbestand	Naturverjüngung, Umgestaltungen des Bachlaufes Ende des 18. Jhd.
Oberhöhe m	RBU 66, WLI 25, GKI 24, SEI 28, TEI 29, HBU 24, GFI 32, BAH 30, SAH 27
Oberdurchmesser cm	RBU 35, WLI 38, GKI 48, SEI 53, TEI 53, HBU 39, GFI 48, BAH 45, SAH 50
Alter a (Höchstalter)	RBU 200, WLI 60, GKI 175, SEI 162, TEI 200, HBU 200, GFI 165, BAH 120, SAH 141

Tabelle 8.2 Übersicht für die Untersuchungsflächen im Raum Dresden Klotzsche (Quelle: Forstamt Klotzsche)

Wuchsgebiet	Westlausitzer Platte und Elbtalzone
Wuchsbezirk	Moritzburg-Radeberger Hügelland
Forstbezirk	Dresden
Revier	Klotzsche
forstliche Klimastufe	Um (untere Berglagen und Hügelland mit mäßig trockenem Klima)
Klima (1961 – 1990)	9,2 °C Jahresmitteltemperatur, 650 mm Jahresniederschlag
Probefläche Kellerbrücke	
Abteilung	238a ³ ; 240a ⁰ ; 241a ⁰
Höhe über NN	170 – 190 m
Gelände	Hang, Oberhang, stark geneigt bis schroff
Exposition	238a ³ : Südost bis Nordost; 240a ⁰ , 241a ⁰ : Süd bis Südost
Inklination	20 – 25°
Bodenfeuchte	Steilhang-Komplexstandort: trocken; terrestrischer Standort: trocken
Nährkraft	mittel
Boden	Ober- und Mittelhang: überwiegend Braunerde; Unterhang, Talauen: Braunerde-Podsol
potentielle nat. Waldges.	Eichen-Hainbuchen Wald, Steilhangkomplexstandort
Baumarten	Gemeine Kiefer, Gemeine Fichte, Trauben-Eiche, Gemeine Robinie, Gewöhnliche Hainbuche, Rot-Eiche, Sand-Birke, Rot-Buche
Entstehung	Kunst/Naturverjüngung
Vorbestand	unbekannt
Oberhöhe m	GKI 27, GFI 26, TE 14, ROB 15, HBU 16, REI 28, GB 25, RBU 30
Oberdurchmesser cm	GKI 43, GFI 45, TE 41, ROB 25, HBU 17, REI 51, GB 36, RBU 64
Alter a (Höchstalter)	GKI 131, GFI 121, TE 111, ROB 50, HBU 65, REI 110, GBI 111, RBU129
Probefläche Prießnitzwasserfall	
Abteilung	133a ¹ ; 233a ⁶ , a ⁸ ; 234a ⁴
Höhe über NN	170 – 180 m
Gelände	Bachgrund, Unterhang, Hang; eben bis steil
Exposition	133a ¹ : eben; 233a ⁰ ; 234a ⁴ : Nordwest bis Südwest, eben
Inklination	bis 20
Bodenfeuchte	Bachtälchenstandort: frisch, terrestrischer Standort: mäßig frisch, frisch
Nährkraft	mittel
Boden	Braunerde, Auenlehm, Auenschluff, podsolige Braunerde, Gley
potentielle nat. Waldges.	Ahorn-Eschen-Schluchtwald, Steilhangkomplexstandort
Baumarten	Gemeine Kiefer, Gemeine Fichte, Stiel-Eiche, Rot-Buche
Entstehung	Kunstverjüngung
Vorbestand	unbekannt, Naturverjüngung
Oberhöhe m	GKI 31, GFI 32, SEI 15, RBU 34
Oberdurchmesser cm	GKI 53, GFI 47, SEI 16, RBU 65
Alter a (Höchstalter)	GKI ,151 GFI 151, SEI 70, RBU 180

Tabelle 8.3 Übersicht über das Vorkommen von Temperaturen unter -1°C nach dem 10.04 seit dem Jahr 1920 bis zum Jahr 2007

Temperaturen nach dem 10.04 unter -1°C							
Jahr	Monat	Tag	Min.Temp. in °C	Jahr	Monat	Tag	Min.Temp. in °C
1922	4	20	-1,5	1975	4	11	-1,4
1922	4	21	-1,5	1976	4	12	-1,4
1922	4	22	-2	1976	4	22	-1,4
1926	5	5	-0,1	1976	4	23	-4
1928	4	17	-2,6	1976	4	28	-1,9
1928	5	10	-0,5	1976	4	29	-3
1929	4	11	-1,4	1977	4	11	-2,3
1929	4	16	-1,3	1978	4	16	-1,6
1929	4	17	-2,7	1978	4	19	-1,2
1929	4	22	-3,6	1978	5	11	-3,4
1929	4	23	-1,9	1979	5	4	-0,4
1933	4	18	-2,1	1979	5	6	-0,9
1933	4	19	-3,6	1980	4	20	-1,2
1933	4	20	-1,5	1980	5	4	-0,6
1935	5	1	-1,2	1980	5	5	-2,9
1935	5	2	-3,3	1981	4	17	-3,4
1935	5	9	-0,1	1981	4	18	-4,1
1938	4	18	-2,1	1981	4	19	-2
1938	4	19	-2,4	1981	4	23	-1,3
1938	4	20	-2,5	1981	4	24	-3
1938	4	21	-2,5	1981	4	25	-1,1
1940	4	12	-2,3	1982	4	14	-1,8
1940	4	13	-3,6	1982	4	19	-2,2
1941	5	2	-0,4	1982	4	22	-2
1941	5	3	-2,2	1982	4	23	-1,6
1941	5	4	-1,1	1984	4	27	-3
1941	5	8	-0,6	1984	4	29	-1,9
1941	5	9	-1,5	1985	4	24	-1,1
1946	4	11	-1,2	1986	4	11	-4,4
1951	4	22	-1,2	1986	4	12	-5,8
1952	5	20	-0,2	1986	4	13	-6,3
1953	5	8	-0,3	1986	4	14	-4,3
1953	5	10	-0,4	1988	4	14	-1,8
1954	4	11	-2,3	1988	4	24	-4,3
1955	4	18	-3,1	1988	4	25	-1,5
1955	4	19	-1,9	1988	4	26	-1,5
1956	4	23	-1,8	1989	4	18	-1,4
1957	4	14	-2,5	1991	4	19	-1,8
1957	5	9	-0,3	1991	4	21	-3,7
1958	4	11	-2,6	1991	4	22	-1,6
1958	4	12	-1,2	1991	4	25	-2,2
1958	4	13	-1,6	1993	4	11	-2,1
1962	5	1	-0,7	1994	4	11	-1,3
1967	4	19	-1,1	1996	4	12	-3,9
1967	4	25	-2	1996	4	13	-2
1968	4	12	-2,8	1996	4	15	-1,6
1968	4	13	-1,2	1997	4	13	-3,1
1969	4	18	-1,4	1997	4	16	-1,1
1969	4	19	-2,4	1997	4	20	-2,5
1969	4	20	-2	1997	4	21	-3,9
1971	4	14	-1,7	1997	4	22	-2,5
1972	4	25	-4,3	2001	4	13	-1,4

Jahr	Monat	Tag	Min.Temp. in °C	Jahr	Monat	Tag	Min.Temp. in °C
1973	4	11	-2,9	2001	4	14	-1,1
1973	4	13	-3	2003	4	12	-1,1
1973	4	14	-2,3	2005	4	21	-2,1
1974	4	14	-2	2005	4	22	-1,8