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 bzw. 035203/38-31202
Fax: 035203–3831272
E-Mail: gillner@forst.tu–dresden.de;
roloff@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 Witterung in den Jahren 2009 und 2010 16

3.3.2 Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und ALVPD 18

3.3.3 Bodenwasserhaushalt 18

3.4 Wachstumsbeschreibung 19

3.5 Klima-Zuwachs-Analysen 20

3.5.1 Trendeliminierung 20

3.5.2 Signalstärke und Qualität der Chronologie 22

3.5.3 Klima-Zuwachs-Analysen 22

3.5.4 Einzeljahr-Analysen 23

3.6 Druckkammermethode nach Scholander 25

3.7 Gaswechselanalytik 25

3.7.1 Transpiration und CO2-Gaswechsel 25

3.7.2 Wassernutzungskoeffizient (WUE) 27

3.8 Statistische Auswertung 28

4 Ergebnisse 29

4.1 Datierung und Synchronisation 29

4.2 Wachstumsbeschreibung 31

4.2.1 Beziehungen der Standortchronologien untereinander 37

4.2.2 Standort und Zuwachs 40

4.3 Klima und Zuwachs 42

4.3.1 Veränderung der Klima-Zuwachs-Relation 54

4.3.2 Einzeljahranalysen 62

4.4 Bodenwasserhaushalt 77

4.5 Blatt-Wasserpotential 80
4.6 Gaswechselanalytik 81
4.6.1 Transpiration 81
4.6.2 Photosynthese und WUE 83
4.6.3 Abhängigkeiten des Gaswechsels vom Bodenwasserhaushalt und dem ALVPD 87
5 Diskussion 95
5.1 Methodenkritik und Datengrundlagen 95
5.2 Kurzdiskussion der dendrochronologischen Ergebnisse 99
5.3 Blatt-Wasserpotential 104
5.4 Gaswechsel 104
6 Schlussfolgerungen und Empfehlung für die zukünftige Verwendung im urbanen Raum 108
7 Literatur 111
8 Anhang 117

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 Leistungsversmögens 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 1.

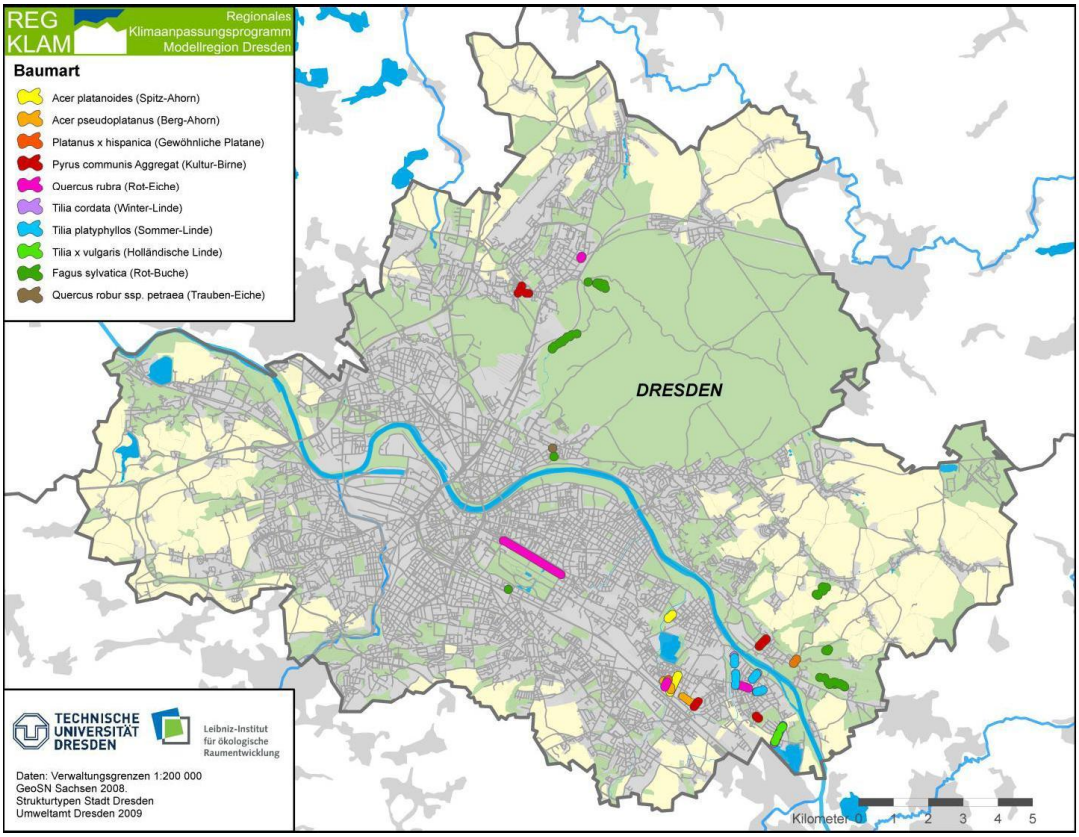


Abbildung 1 Übersichtskarte der dendrochronologischen Probestandorte im Stadtgebiet von Dresden

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 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 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 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 1 ist die Berechnung zur statistischen Überprüfung der Abweichung zwischen der Porosität der Straßenbaumstandorte nach dem χ^2-Ansatz (SACHS & HEDDERICH, 2006) angegeben.

$$|\overline{R_i} - \overline{R_{i'}}| > \sqrt{d \times \chi^2{}_{k-1;0,95} \times \left[\frac{n(n+1)}{12}\right]\left[\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_{i'}}\right]} \qquad (1)$$

d = 1, treten viele Bindungen auf, dann ist

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{i=r}(t^3{}_i - t_i)}{n^3 - n} \qquad (2)$$

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 2 sind die Arten und Straßenbaumstandorte sowie die Anzahl der Bäume pro Standort aufgelistet, für die die Gaswechselanalytik durchgeführt wurde. Zusätzlich wurden zu jedem Messbaum Messanlagen zur diskontinuierlichen Ermittlung des Bodenwassergehaltes und des Bodenmatrixpotentials installiert.

Tabelle 2 Arten und Standorte für die Ermittlung des Bodenwasserhaushaltes und der Ökophysiologie

Arten		Anzahl der Bäume	Standort
Acer platanoides	Spitz-Ahorn	5	Lilienthalstraße
Acer pseudoplatanus	Berg-Ahorn	5	Sachsenwerkstraße
Platanus x hispanica	Ahornblättrige Platane	6	Robert-Berndt-Straße
Quercus rubra	Rot-Eiche	3	Robert-Berndt-Straße
Tilia platyphyllos	Sommer-Linde	4	Krippener Straße
Tilia x vulgaris	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. Die Vitalitätsbeurteilung erfolgte anhand der Kronenstruktur nach ROLOFF (2001). 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 vorrangig 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 Jahrringausfälle oder undeutliche Jahrringgrenzen 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.

Für ein bestmögliches Erkennen der Jahrringgrenzen 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 Jahrringgrenzen 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.

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.

Tabelle 3 Übersicht der Baumarten, Standorte (W = Waldbaum, S = Straßenbaum, E = städtischer Einzelbaum), Proben (B = Bohrproben, S = Stammscheibe), Anzahl der Probebäume je Standort

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

Letztendlich wurde aus den Bohrkernen und Stammriegel die Grundlage für die dendrochronologischen Auswertung für insgesamt 117 Waldbäume und 350 Stadtbäume geschaffen.

3.2.3 Vordatierung und Vermessung

Aufgabe des Dendrochronologen ist es, aus der Fülle möglicher Synchronlagen, die richtige herauszufinden. 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. So wird die Anzahl der möglichen Synchronlagen soweit eingeschränkt, dass die Voraussetzung für eine endgültige jahrgenaue Zuweisung im Schritt der Synchronisation gegeben ist.

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 Radien (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) 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 Δi = (xi+1-xi); wenn:

$$\Delta i > 0 : Gix = 1$$
$$\Delta i = 0 : Gix = 0$$
$$\Delta i < 0 : Gix = \quad 1$$

Für zwei Kurven

$$G_{(x,y)} = \frac{1}{n \quad 1} \sum_{i=1}^{n \quad 1} \left| G_{ix} + G_{iy} \right| \qquad (3)$$

Ein weiterer Anhaltspunkt für die Ermittlung des Grads der Abhängigkeit zweier Jahrringzeitreihen ist der Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson (STEIGER, 1980) (Formel 3). Anhand dessen wird die Stärke der Zuwachsänderung sichtbar und die zu vergleichenden Wertepaaren auf ihren linearen Zusammenhang (Wert von -1 bis +1) überprüft.

$$r = \frac{\sum (x \quad \bar{x})(y \quad \bar{y})}{\sqrt{\sum (x \quad \bar{x})^2 \sum (y \quad \bar{y})^2}} \qquad (4)$$

Die t-Werte nach BAILLIE & PILCHER (1973) (Formel 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 (Formel 4). 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 6 dargestellte Berechnung zur Indexierung verwendet.

$$t = |r| \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \qquad (5)$$

n = Überlappungslänge

r = Korrelationskoeffizient

$$wi = \log \frac{x_i}{x_{i+1}} \quad (6)$$

wi = Wuchswert im Jahr i

xi = 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

Um die Beziehung zwischen dem Radialzuwachs und dem Klima zu ermitteln, wurden die klimatischen Analysen mit den beiden Parametern Lufttemperatur und Niederschlag durchgeführt. Für alle Standorte wurde mit langjährigen Zeitreihen der Monatsmittelwerte gearbeitet, die bis in das Jahr 1812 zurückreichen und durch die Professur für Meteorologie der TU Dresden bereitgestellt wurden. Im Zeitraum von 1812 bis 1916 wurden die Monatsmittelwerte von Temperatur und Niederschlag verschiedener Quellen zu einheitlichen Zeitreihen zusammengesetzt. Von 1917 bis Ende des Jahres 1966 basieren die Zeitreihen auf den Messdaten der Klimastationen Radebeul-Wahnsdorf (51°07'12'' N, 13°40'37'', 246 m. ü NN) und ab dem Jahr 1967 auf den Daten der Station Dresden-Klotzsche (51°07'45'' N, 13°45'22'', 227 m. ü NN). Eine Übersicht über die Beobachtungsorte vor 1916 liefern BERNHOFER et al. (2009). Die letztgenannten Klimastationen liegen außerhalb des Dresdner Elbtals und damit annährend 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.). Die Zeitreihen wurden auf Inhomogenitäten, die z.B. durch Stationsverlegungen oder einen Austausch von Messgeräten verursacht wurden, geprüft und gegebenenfalls homogenisiert. Für die Prüfung kamen verschiedenen Verfahren aus einer

Verknüpfung eines Fehlwertkriteriums, eines Ausreißer- und Stationaritätstests sowie numerische und graphische Homogenitätstests zum Einsatz (FRANKE et al., 2004, 2007). Auch die Messreihen der Niederschläge wiesen systematische Fehler auf, die durch das Korrekturverfahren von ERBE (2002) auf Grundlage von RICHTER (1995) beseitigt werden konnten.

Um mögliche Wirkungszusammenhänge zwischen dem Klima und dem Zuwachs der Weiserjahre abzuleiten wurden die Zeitreihen der Temperatur und des Niederschlags im Zeitraum 1920 bis 2007 normalisiert, 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.
Der Einfluss von Trockenjahren und die sich daran anschließende Erholung wurden zwischen 1917 und 2002 für insgesamt acht Trockenjahre ermittelt, die zu einer sogenannten 'superposed epoch' (LOUGH & FRITTS, 1987) zusammengefasst wurden (vgl. Kap. 2.5.4). Die Kriterien für die Auswahl der Trockenjahre waren: (a) überdurchschnittliche Temperaturmittelwerte, (b) Niederschlagssummen niedriger als 77% im Vergleich zum langjährigen Mittel im Zeitfenster von April bis Juli in der Jahre 1917 bis 2002 sowie (c) der selbstkalibrierende 'Palmer Drought Severity Index' (PDSI, nimmt Werte von mindestens -1.8 bis -5.4 an) (VAN et al., 2006; WELLS et al., 2004). Dieser Index integriert letztendlich Temperatur, Niederschlag und Evapotranspiration in ein Maß zur Beurteilung der Bodenfeuchteverfügbarkeit der Region. Negative Werte unter -4 sind als „extrem trocken“ definiert. Positive Werte über +4 stehen für extrem feuchte Bedingungen. Mit Hilfe dieser Selektion wurden die Jahre 1934, 1947, 1954, 1964, 1976, 1983, 1990 und 1993 als Trockenjahre ausgewiesen. Für zwei Jahre, 1954 und 1993, wurden die gewählten Maßstäbe für die Niederschlagssummen und die durchschnittlichen Temperaturen im Zeitraum April bis Juli nicht erreicht. Dennoch wurden diese beiden Jahre in die Berechnungen einbezogen, da die Niederschlagssummen und Temperaturen im Frühjahr von März, April bis Juni stark unter- bzw. überdurchschnittlich waren und nur einzelne Monate höhere Werte aufwiesen, was zu einem insgesamt hohen Wasserdefizit in der Vegetationsperiode führte.

3.3.1 Witterung in den Jahren 2009 und 2010

Für die beiden Untersuchungsjahre 2009 und 2010 ist in Abbildung 2 der Witterungsverlauf auf Basis der Datenreihen des Deutschen Wetterdienstes gegenübergestellt. Dabei wird besonders deutlich, dass sich der Niederschlag des Jahres 2010 mit hohen Regenmengen im August/September und einem Jahresniederschlag mit 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 Gaswechselanalytik 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 .

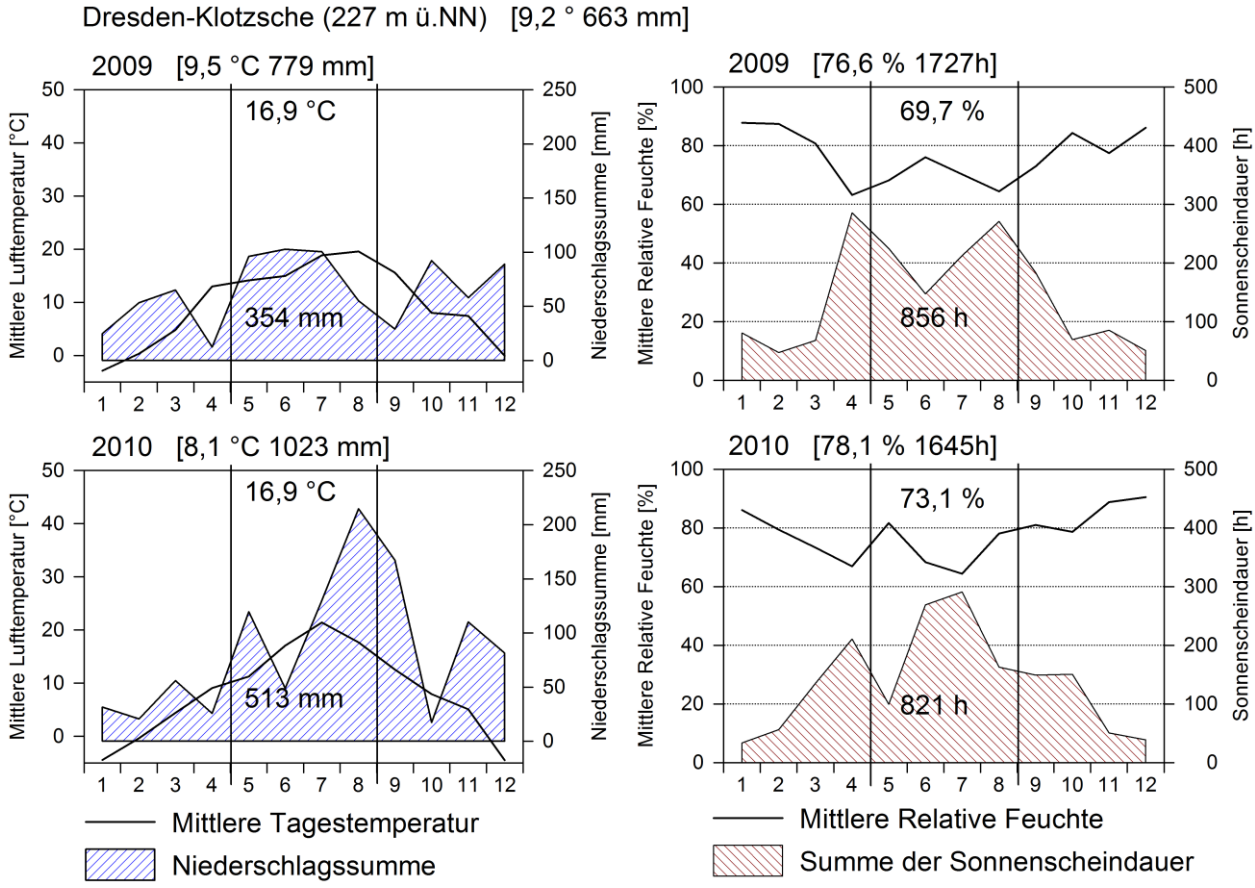


Abbildung 2 Klimatische Verhältnisse in den Untersuchungsjahren 2009 und 2010. Die Zeitreihen wurden anhand der Monatswerte der mittleren Lufttemperatur, der Niederschlagssummen, der mittleren relativen Feuchte sowie der Sonnenscheindauer zusammengestellt. Dabei sind Mittelwerte, bzw. Summen für die 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.

3.3.2 Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und ALVPD

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

Auf Basis der Datensätze der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurde mit Hilfe der MAGNUS-Formel das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft (VPD, hPa) berechnet (Gleichung 7).

$$e^0 = 6{,}1078 * e^{((17{,}08085*Tu)/(234{,}175+Tu))} \quad (7)$$

Tv Umgebungstemperatur [°C]

e^0 Sättigungsdampfdruck [hPa]

e Wasserdampfdruck der Umgebungsluft [hPa]

Mit Hilfe der relativen Luftfeuchte (RF) wurde aus Gleichung 8 der Wasserdampfdruck der Umgebungsluft ermittelt.

$$\boldsymbol{e} = \frac{RF * e^0}{100} \quad (8)$$

Schließlich lässt sich aus dem Sättigungsdampfdruck und dem Wasserdampfdruck der Umgebungsluft das VPD (Gleichung 9) bilden.

$$VPD = e^0 - e \quad (9)$$

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.

3.3.3 Bodenwasserhaushalt

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 100 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 ± 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.

Stark schwankende Zuwachsverläufe kommen durch eine hohe mittlere Sensitivität zum Ausdruck und werden deshalb als sensitiv bezeichnet (COOK & BRIFFA, 1990). Sind die Jahrringabfolgen durch eine geringe Variation mit ausgeglichenen Zuwachsverläufen gekennzeichnet, spricht man von einem gleichförmigen Kurvenverlauf (FRITTS, 1976, SCHWEINGRUBER, 1983). Mit Hilfe des in Formel 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. Hier muss jedoch beachtet werden, dass sehr wenige starke Wachstumsschwankungen ähnliche Werte wie mehrere schwächere Schwankungen liefern (BRÄUNING, 1999, zit. aus NEUWIRTH, 2004). Deshalb wurde zu jeder Jahrringzeitreihe zusätzlich die Varianz ermittelt, um Fehlaussagen ausschließen zu können.

$$S_z = \frac{1}{s-1}\sum_{t=1}^{s-1}\left|\frac{2(Z_{t+1}-Z_t)}{Z_{t+1}+Z_t}\right| \qquad (10)$$

t = 1,….., 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 zu vorherigen Jahrringbreiten (NEUMANN, 2001) wiedergibt, lässt sich diese Vorgabe erfüllen und gleichzeitig Aussagen zum Puffer- und Reglungsvermögen der Bäume treffen. In dieser Arbeit wurde die Autokorrelation erster Ordnung berechnet (Formel 11), indem die jeweilige Zeitreihe phasenverschoben mit sich selbst korreliert wurde.

$$R_1 = \frac{\sum_{t=2}^{u}(Z_t \quad m_z)(Z_{t \quad 1} \quad m_z)}{(s \quad 1)s_z} \qquad (11)$$

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, d.h. dem Ziel einer Analyse der Klima-Zuwachsbeziehung gerecht zu werden, muss im Schritt der Indexierung bzw. Standardisierung eine Trendbereinigung durchgeführt werden (COOK & PETERS, 1997). Der Alterstrend stellt dabei meistens die Hauptkomponente für den langfristigen Trend der Zuwachszeitreihen (FRITTS, 1991, NEUMANN, 2001, PRETZSCH, 2002, SCHWEINGRUBER, 1983). Generell weisen jüngere Bäume ungefähr die gleiche Holzproduktivität wie ältere Exemplare auf. Da aber der Umfang mit dem Alter zunimmt, werden die

Jahrringe mit zunehmenden Alter schmaler (AFFOLTER, 2007, BONN, 1998, COOK & PETERS, 1997, BRÄKER, 1981). Neben dem Alterstrend können Immissionen (FRITTS, 1976, PRETZSCH & UTSCHIG, 1989, WENK & VOGEL, 1995), das inter- und intraspezifische Konkurrenzverhalten der Baumarten oder langjährige Kalamitäten (RIGLING & CHERUBINI, 1999) das Zuwachsgeschehen prägen und zu einem entsprechenden Trend in den Wachstumskurven führen. Bei Stadt- und Straßenbäumen lassen sich hier noch zusätzlich Schnittmaßnahmen im Kronenbereich und Baumaßnahmen, die zu Wurzelverletzungen oder -verlusten führen, aufführen. Die Trendeliminierung der Zuwachszeitreihen bewirkt, dass die gemeinsame Varianz betont wird, die in einer höheren Homogenität der Einzelkurven eines Standortes zum Ausdruck kommt und niedrig-frequentiere Anteile eliminiert werden. Die Variation 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 wurde 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 Hugershoff Funktion. Im zweiten Schritt wurde eine stochastische Methode, die sog. „kubische Spline“-Funktion von 60 Jahren an jede Jahrringzeitreihe angepasst. Für eine Prüfung des Einflusses unterschiedliche Filterlängen auf die Varianz der finalen Chronologie sowie zur Festlegung der Länge des Zeitfensters für die „kubische Spline“-Funktion, wurde die Standardisierung probeweise mit unterschiedlich flexiblen Filtern durchgeführt. Größere Filterlängen und damit steifere Filter, z.B. 200 Jahre, bewirken häufig eine höhere Varianz zu Beginn und am Ende der Zeitreihe. Die Wahl von kurzen Filterlängen resultiert in einer stärkeren Anpassung der Ausgleichskurve an die Rohdaten, kann aber gleichzeitig zu einem Verlust an interdekadischer Varianz führen (AFFOLTER, 2007). 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 Rohwerte der Jahrringbreitenserien weisen abweichende Varianzen auf. 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 zu stabilisieren und 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).

Das Expressed Population Signal (EPS) gibt das Verhältnis von mittleren Signal der Indexreihen (=Varianz der Signalkomponente) zur Gesamtvarianz der Chronologie wieder (NEUMANN, 2001). Es wurde mit dem Programm ARSTAN berechnet (HOLMES et al., 1986). Dazu wurden 50 Jahre mit einer Überlappungslänge von 25 Jahren geprüft. Der EPS Wert gibt Auskunft über die Exaktheit der Stichprobengröße. WIGLEY et al. (1984) legen einen Schwellenwert von 0,85 fest, den das EPS nicht unterschreiten sollte.

3.5.2 Signalstärke und Qualität der Chronologie

Jede Jahrringchronologie kann als eine Abfolge von Auswirkungen verschiedenster Einflüsse betrachtet werden (MÄKINEN & VANNINEN, 1999). Neben der Komponente des Signals, die den interpretierbaren Informationsgehalt der Zeitreihen beinhaltet, findet sich in den Zeitreihen eine zweite Komponente, das sogenannte Rauschen. Durch einen hohen Anteil des Rauschens in den Zuwachszeitreihen wird die Genauigkeit und letztendlich die Qualität der Aussagekraft der Analysen vermindert. 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. 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 sowie Niederschlag und den Jahrringbreitenindex wurde monatsweise über Korrelationsanalysen untersucht. Mit Hilfe des Programms Dendroclim2002 (BIONDI & WAIKUL, 2004) wird ein „bootstraping“ durchgeführt, indem künstlich ein höherer Stichprobenumfang (1000 Stichproben) generiert wird und wiederholt Stichproben aus demselben Datensatz gezogen werden. Dieses Verfahren dient zur Herleitung von Konfidenzintervallen und letztendlich zur Bestimmung der Signifikanz der Zusammenhänge auf dem

95% Niveau. 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.

Die Prüfung mittels moving intervals ermöglicht Aussagen zur zeitlichen Stabilität der klimatischen Wirkung von Temperatur und Niederschlag 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.

3.5.4 Einzeljahr-Analysen

Weiserjahre

Weiserjahranalysen sind ein allgemein akzeptiertes und weit verbreitetes Kriterium um stark über bzw. unterdurchschnittliche Wachstumsraten einzelner Jahre zu bestimmen. Dabei müssen diese in einem Großteil des Kollektivs innerhalb einer Untersuchungseinheit (z.B. südexponierte Hanglage, Straßenbaumstandort mit geringer mittlerer Porosität) auftreten (SCHWEINGRUBER et al., 1990). Der Schwerpunkt der Ursachenforschung für das Auftreten von Weiserjahren liegt auf den klimatischen Beziehungen zum Radialzuwachs, wobei aber meist nur Niederschlag und Temperatur verwendet werden. Damit 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. Daneben werden Weiserjahranalysen häufig angewandt um z.B. die Frequenz und den Einfluss von Insektenkalamitäten zu determinieren (ESPER et al., 2007).

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 Periode von 1940 bis 2007 die Standardabweichung von 1 und ein Mittelwert von 0 definiert 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 das Reaktionsverhalten der einzelnen Arten gegenübergestellt sowie eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse durch die Fokussierung der Analyse auf den Zeitraum 1920 bis 2007, den alle Altbäume abdecken und 1955 bis 2007 für die kürzeren Chronologien, gewährleistet. Ein weiterer Vorteil dieser Berechnungen liegt darin, dass keine Schwellenwerte für

die indexierten Kurven festgelegt müssen, die eher subjektiv herbeigeleitet werden und art- und standortsabhängig variieren können.

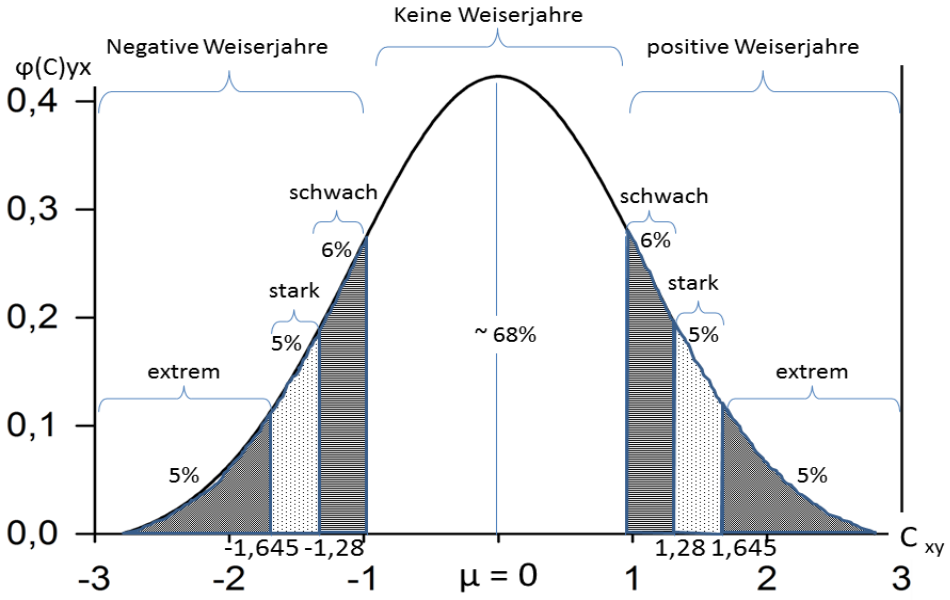


Abbildung 3 Dichtefunktionen der Normalverteilungen φ (Z) = 0 und σ = 1 für die drei Gruppen von Weiserjahren (schwach, stark, extrem)

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 $-1 \leq C \leq 1$). 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).

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 Weiserjahranalyse 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. ‚bootstrapings‘ 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 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 Gaswechselanalytik

3.7.1 Transpiration und CO2-Gaswechsel

Bei der Gaswechselanalytik werden die pflanzlichen CO_2-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. 4).

Abbildung 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 µmol/$m^{-2}s^{-1}$ durchgeführt.

Für die Netto-Photosynthese- und Transpirationsmessungen 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 12) berechnet wurden (VON CAEMMERER & FARQUHAR 1981) aufgeführt.

$$E = \frac{u_e * (w_o - w_e)}{LA * (1 - w_o)} \quad (12)$$

$$NP = \frac{u_e}{LA} * \frac{1 - w_e}{1 - w_o} * (c_e - c_o) - E * c_e \quad (13)$$

NP Netto-Photosyntheserate CO_2 [µmol/$m^{-2}s^{-1}$]
u_e molarer Fluss am Messküvetteneingang während eines Messpunktes MP [mmol s^{-1}]
LA Bezugsgröße, hier als Blattfläche [cm^2]
w_e H_2O-Stoffmengenanteil am Messküvetteneingang [ppm]
w_o H_2O-Stoffmengenanteil am Messküvettenausgang [ppm]
c_e CO_2-Stoffmengenanteil am Messküvetteneingang [ppm]
c_o CO_2-Stoffmengenanteil am Messküvettenausgang [ppm]
E Transpirationsrate H_2O [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 CO_2 und des in der Transpiration abgegebenen H_2O gebildet (Gleichung 14).

$$WUE = \frac{NP}{E} \quad (14)$$

WUE Effizienz der Wassernutzung [µmol/$m^{-2}s^{-1}$/ mmol s^{-1}]

Der Wasserausnutzungskoeffizient der Photosynthese ist dabei letztlich eine Größe, die alle Funktionen der Vermeidung von Trockenstress, der Trockenstresstoleranz und alle Stoffwechselvorgänge, 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

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 Part der Arbeit konzentriert sich auf die Untersuchung der Wachstumsmuster von insgesamt 503 Bäumen mit insgesamt 1466 Bohrproben für 10 Baumarten. Von den 503 Wald- und Stadtbäumen konnten die Proben von 467 Bäumen zu sicher synchronisierten Baumittelkurven zusammengefügt werden (Tab. 4). Damit wurde eine Datengrundlage für die klimatische Interpretation von 7 Standortchronologien für Waldbäume (W), 3 urbane Einzelbaumchronologien (E) und 19 urbane Straßenbaumchronologien (S) für den Dresdner Raum geschaffen.

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. Die Probe einer Platane in Abbildung 5 verdeutlicht die Schwierigkeiten bei der korrekten Zuordnung der Jahrringgrenzen.

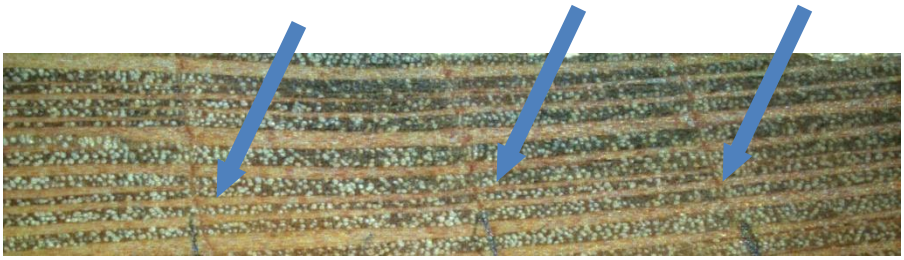


Abbildung 5 Beispiel für undeutliche Jahrringgrenzen (Ahornblättrige Platane, Katasternummer 7, Robert-Berndt-Straße)

Im Vergleich dazu waren die Spätholz-Frühholz-Grenzen der einzelnen Jahrringe der Baumarten Rot-Buche, Trauben-Eiche sowie Rot-Eiche stets gut zu erkennen (vgl. Abb. 6). Für diese Baumarten wurden keine ausfallenden Jahrringe festgestellt.

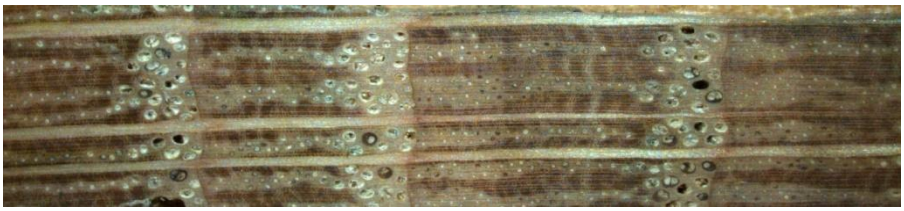


Abbildung 6 Beispiel für deutliche Jahrringgrenzen (Rot-Eiche, Katasternummer 12, Robert-Berndt-Straße)

Tabelle 4 Übersicht über die Anzahl der beprobten Bäume pro Standort (W = Waldbaum, S = Straßenbaum, 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.
Acer platanoides	Apl	S	Berchtesgadener Straße (BER)	13	13			
Acer platanoides	Apl	S	Lilienthalstraße (LIL)	36	36	5	1	5
Acer platanoides	Apl	S	Sachsenwerkstraße (SAC)	6	6	3	2	2
Acer pseudoplatanus	Aps	S	Sachsenwerkstraße (SAC)	27	24	3	1	2
Fagus sylvatica	Fsy	W	Borsberghänge (BOR)	19	19			
Fagus sylvatica	Fsy	E	Bosewitzer Straße (BOS)	1	1			
Fagus sylvatica	Fsy	W	Friedrichsgrund (FRI)	16	16			
Fagus sylvatica	Fsy	W	Kellerbrücke (KEL)	16	16			
Fagus sylvatica	Fsy	W	Prießnitzwasserfall (PRI)	16	16			
Fagus sylvatica	Fsy	E	Waldschlösschenstraße (WSC)	1	1			
Fagus sylvatica	Fsy	E	Wiener Straße (WIE)	2	2			
Platanus x *hispanica*	Pxh	S	Meixstraße (MEI)	6	0			
Platanus x *hispanica*	Pxh	S	Robert-Berndt-Straße (ROB)	14	14	4	2	1
Pyrus communis	Pco	S	Am Hellerrand (AM)	8	0			
Pyrus communis	Pco	S	Bernard-Shaw-Straße (BSH)	10	10	16	7	2
Pyrus communis	Pco	S	Försterlingstraße (FOE)	12	12	4	5	4
Pyrus communis	Pco	S	Nussallee (NUS)	57	54	8	3	10
Pyrus communis	Pco	S	W.-Shakespeare-Straße (WIL)	8	0			
Quercus robur subsp. *sessiliflora*	Qrs	W	Borsberghänge (BOR)	19	19			
Quercus robur subsp. *sessiliflora*	Qrs	S	Waldschlösschenstraße (WSC)	12	12			
Quercus rubra	Qru	W	Borsberghänge (BOR)	19	19			
Quercus rubra	Qru	S	Käthe-Kollwitz-Platz (KKP)	14	14			
Quercus rubra	Qru	S	Robert-Berndt-Straße (ROB)	10	10			
Quercus rubra	Qru	S	Stübelallee (STU)	48	48			
Quercus rubra	Qru	S	Stübelallee (STUJ)	12	10			
Quercus rubra	Qru	S	Zschierener Straße (ZSC)	10	10			
Tilia cordata	Tco	W	Borsberghänge (BOR)	18	12	6	3	2
Tilia cordata	Tco	S	Tronitzer Straße (TRO)	10	10	12	5	4
Tilia platyphyllos	Tpl	S	Krippener Straße (KRI)	14	14	7	5	2
Tilia platyphyllos	Tpl	S	Meußlitzer Straße (MEU)	12	12	12	7	4
Tilia platyphyllos	Tpl	S	Peter-Schmoll-Straße (PSC)	13	13	8	4	3
Tilia platyphyllos	Tpl	S	Tronitzer Straße (TRO)	12	12	13	9	5
Tilia x *vulgaris*	Txv	S	Tronitzer Straße (TRO)	12	12	8	8	5

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, was hauptsächlich auf die sehr eng beieinander liegenden, undeutlichen Jahrringgrenzen und partiellen Jahrringausfällen bzw. auskeilenden Jahrringen sowie sehr individuellen Wachstumsverläufen der Einzelbäume zurückzuführen war. 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 (vgl. Abb. 7).

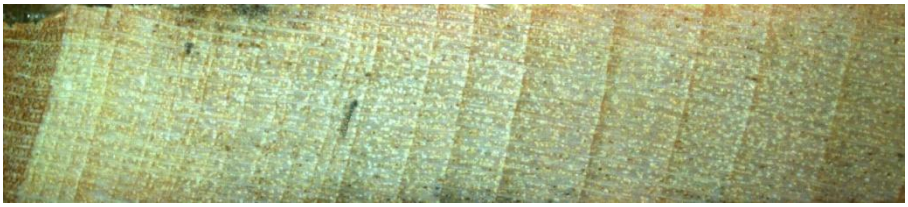


Abbildung 7 Beispiel für sehr eng beieinander liegenden und undeutlichen Jahrringgrenzen (Winter-Linde, Katasternummer 27, Tronitzer Straße)

Diese Probleme führten für insgesamt 51 Bäume zu einer Kürzung der Zeitreihen. Damit konnte die betreffende Baummittelkurve für die Bildung der Standortchronologie verwendet werden. 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. 8 bis 13).

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 5 (S. 36) sind die wesentlichen Parameter zur Wachstumsbeschreibung der Standortchronologien zusammengestellt. Mit Ausnahme für die städtischen Einzelbäume der Rot-Buche (Abb. 9, 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 (S. 30).

Der mittlere jährliche Radialzuwachs ist stark vom durchschnittlichen Alter der Bäume abhängig, dies muss für den Vergleich der Baumarten und Standorte berücksichtigt werden. Zusätzlich erschwert wird die Interpretation dadurch, dass die Chronologien der Waldbäume, z.B. für die Trauben-Eichen und die Rot-Buchen, häufig aus Individuen ungleichen Alters gebildet wurden. Hierdurch wird der Zuwachsverlauf der Chronologien auf ein Niveau gemittelt, in dem nur wenige mittelfristige Trendänderungen erkennbar sind. Dagegen setzen sich die Mittelkurven der Stadtbaumchronologien aus Zeitreihen ähnlicher Länge zusammen, da die Mehrzahl der Straßenbäume pro Standort im gleichen Jahr gepflanzt wurde und dadurch alle gleich alt sind.

Dieser Unterschied zwischen Stadt- und Waldbäumen hat zur Folge, dass die Chronologien der Stadtbäume häufig einen starkes Jugendwachstums erkennen lassen, da sich die Mehrzahl dieser Bäume zur gleichen Zeit in der gleichen Entwicklungsphase befindet. Vier städtische Chronologien (AplBER, FsyBOS, PxhROB, QruKKP, Abkürzungen in Tab. 4) 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. 9, rechts). Bei diesem Baum konnten die stärksten Zuwächse um das Jahr 1960 ermittelt werden. Zu dieser Zeit war der Baum schon mehr als 100 Jahre alt. Die beiden Chronologien der urbanen Trauben-Eiche (Abbildung 11, links) zeigen in den letzten fünf Dekaden eine beständige, aber nur leichte Abnahme der jährlichen Zuwächse. Alle anderen Baumarten offenbaren stärkere Zuwachsrückgänge, besonders in den letzten zwei bis drei Dekaden. Beispiele für einen besonders dramatischen Rückgang der jährlichen Zuwachsleistung sind die drei Chronologien der Kultur-Birne, die in den letzten fünf Jahren einen jährlichen Zuwachs von 0,15 cm nicht überschreiten, sowie die beiden Chronologien der Winter-Linde in Abbildung 12 (links) und der Ahorne (Abb. 8). Obwohl sich die Standortbedingungen für die Chronologien je Art deutlich unterscheiden (vgl. Kap. 3.2.2, Standort und Zuwachs) gleichen sich die jährlichen Radialzuwächse und damit auch das Zuwachsniveau im letzten Jahrzehnt zunehmend an.

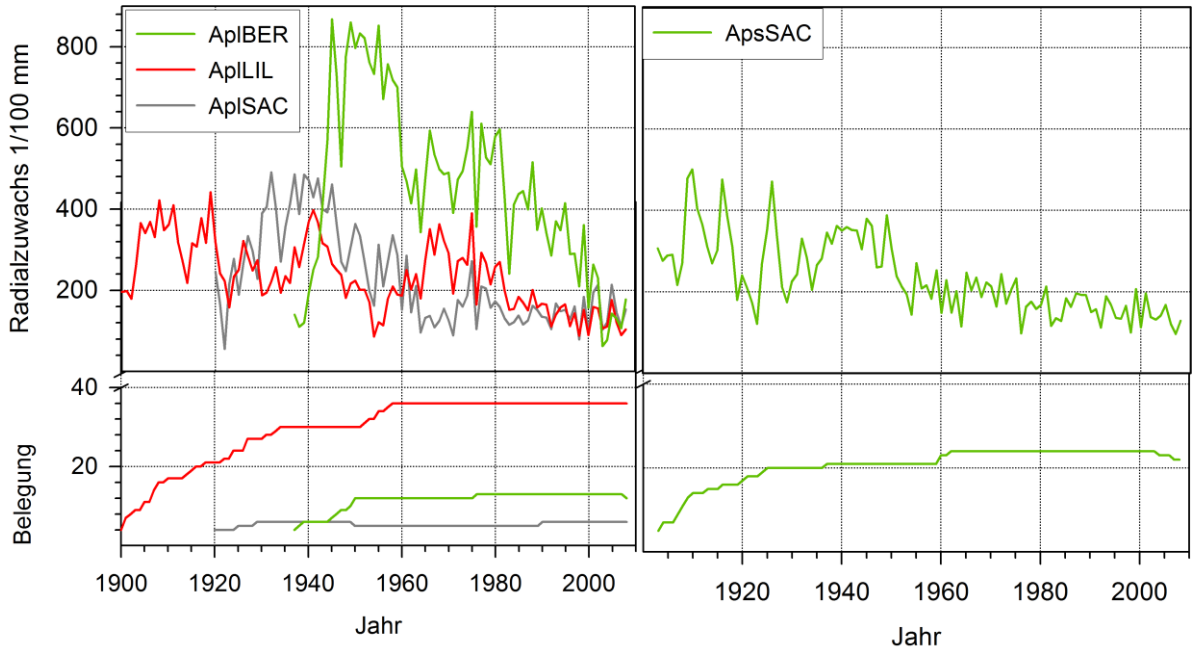


Abbildung 8 Standortchronologien der Spitz-Ahorne (Apl, links) und des Berg-Ahorns (Aps, rechts) sowie deren Belegung

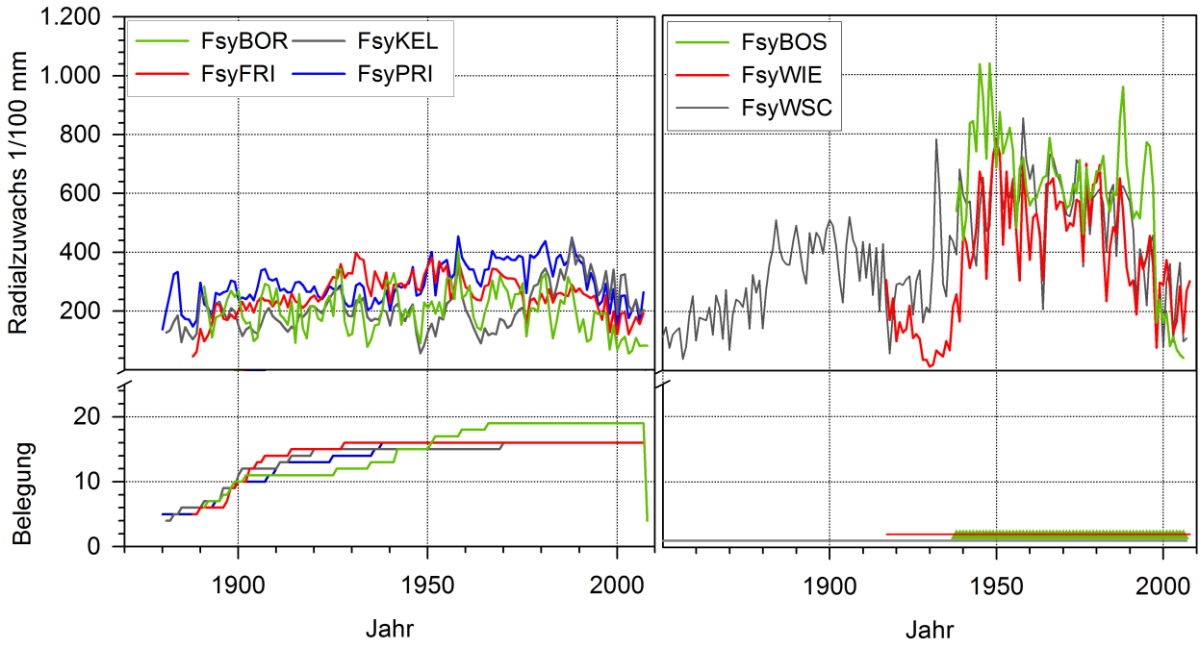


Abbildung 9 Standortchronologien der Waldbäume (links) und der Einzelbäume im städtischen Raum (rechts) der Rot-Buchen (Fsy) sowie deren Belegung

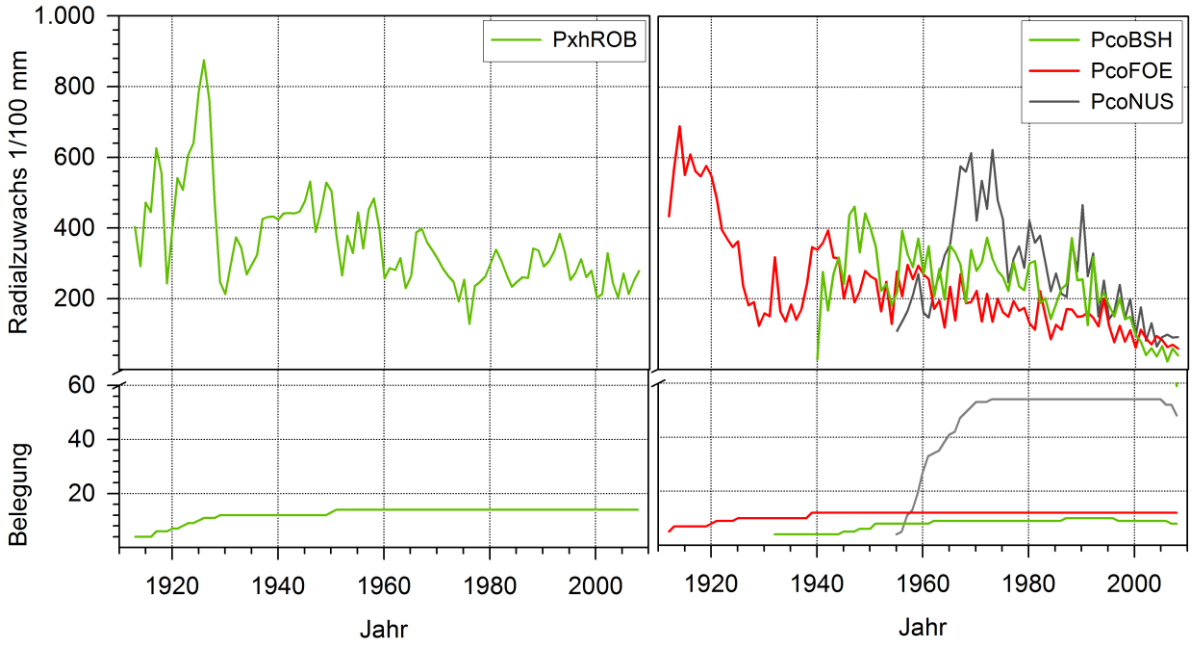


Abbildung 10 Standortchronologien der Ahornblättrigen Platane (Pxh, links) und der Kultur-Birne (Pco, rechts) sowie deren Belegung

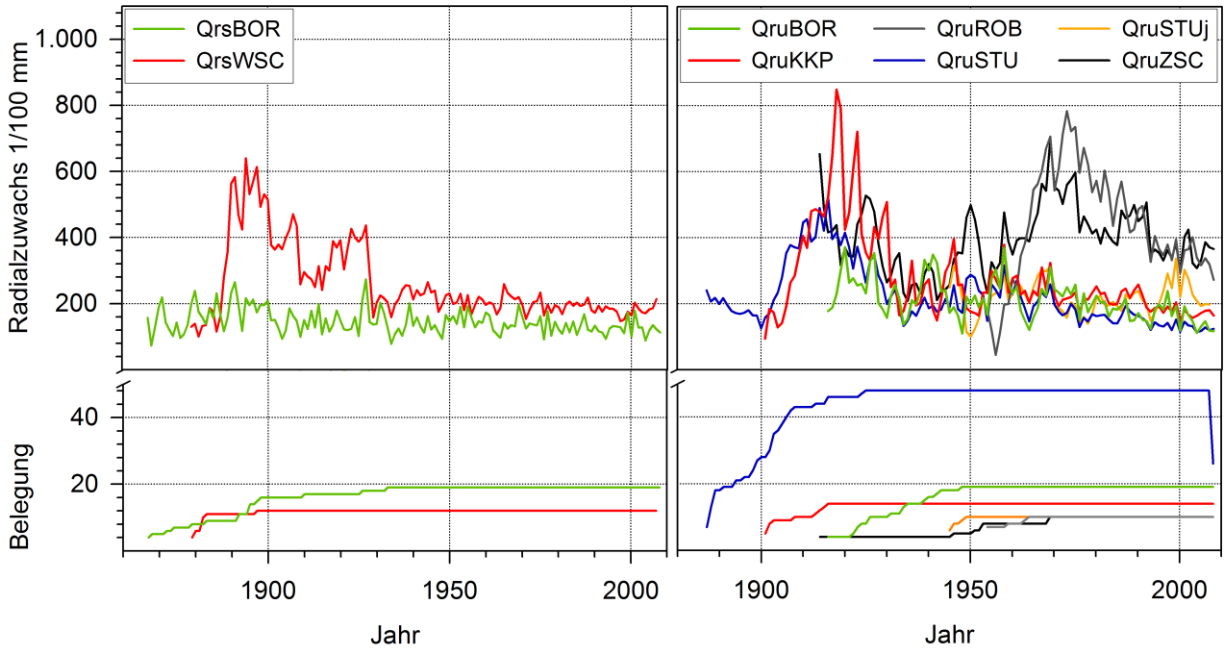


Abbildung 11 Standortchronologien der Trauben-Eichen (Qrs, links) und der Rot-Eichen (Qru, rechts) sowie deren Belegung

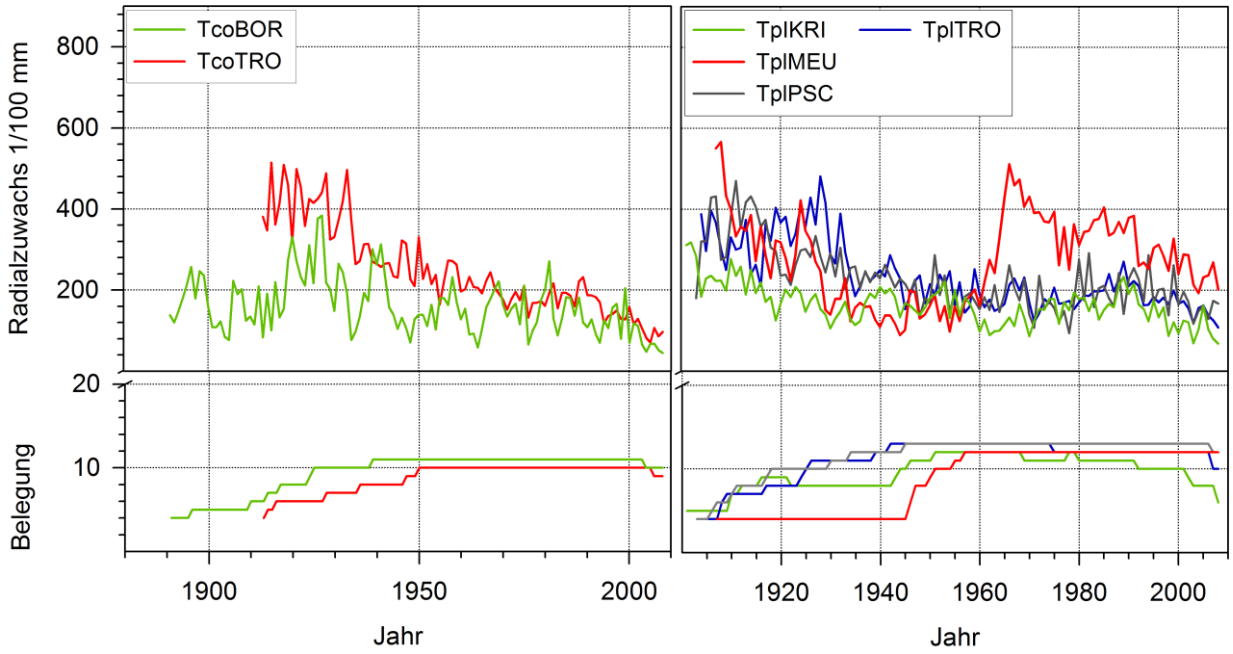


Abbildung 12 Standortchronologien der Winter-Linde (Tco, links) und der Sommer-Linde (Tpl, rechts) sowie deren Belegung

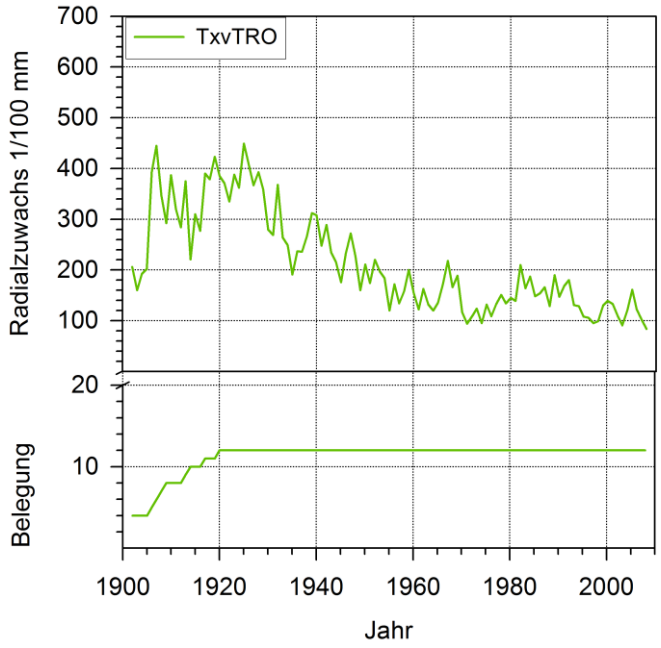


Abbildung 13 Standortchronologie der Holländischen Linde (Txv) sowie deren Belegung

Die Standortchronologie der Sommer-Linde auf der Meußlitzer Straße (TplMEU, Abbildung 12, 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. Chronologien mit hohen durchschnittlichen jährlichen Radialzuwächsen wie die Spitz-Ahorne der Berchtesgadener Straße (AplBERC), die Rot-Eichen der Robert-Berndt-Straße (QruROB) oder die Kultur-Birnen der Nussallee (PcoNUS) zeichnen sich in aller Regel durch eine hohe Standardabweichung aus (vgl. Tabelle 5).

Die Belegung der Chronologien liegt in vielen Fällen unterhalb der als kritischem Level angesehenen Zahl von 15 Baummittelkurven je Standortchronologie. Für keine der Linden-Chronologien (Abb. 12 und 13) wurde eine Belegungsstärke von 14 Baummittelkurven überschritten, was sich auch in den geringen mittleren EPS-Werten von teilweise nur 0,72 zeigt (Tab. 5). Damit ist die Signalstärke aller städtischen Linden-Chronologien schwach, wodurch wiederum der gemeinsame Informationsgehalt verringert wird. Auch für die Spitz-Ahorne auf der Sachsenwerkstraße (AplSAC), die Birnbäume auf der Försterlingstraße (PcoFOE) und die Rot-Eichen auf der Zschierener Straße (QruZSC) stand nur eine geringe Anzahl von Baummittelkurven für die Bildung der Standortchronologien zur Verfügung. Dennoch liegt das mittlere EPS über der kritischen Marke von 0,85, damit können diese Chronologien trotzdem als sicher angesehen werden. Für die drei Einzelbaumchronologien der Rot-Buche konnte kein EPS berechnet werden.

Tabelle 5 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 Tab. 4 (S. 30).

Art Abk.	Standort Abk.	Periode (n>4)	Mittl. jährl. Radialzuwachs ± Std. [mm] a	Mittl. Sens. b	Autok. (1.Ord.) b	Mittl. EPS c
Acer platanoides						
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
Acer pseudoplatanus						
Aps	SAC	1903-2008	2,34 ± 0,92	0,41	0,27	0,88
Fagus sylvatica						
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	-
Platanus x *hispanica*						
Pxh	ROB	1913-2008	3,59 ± 1,32	0,27	0,59	0,90
Pyrus communis						
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
Quercus robur subsp. *sessiliflora*						
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
Quercus rubra						
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
Tilia cordata						
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	0,72
Tilia platyphyllos						
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	0,78
Tilia x *vulgaris*						
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 5). Alle drei Chronologien der Kultur-Birne und die vier Chronologien der beiden Ahornarten weisen eine hohe mittlere Sensitivität bei gleichzeitig niedriger Autokorrelation auf. Damit ist das Wachstum dieser Baumarten stark von den Umwelteinflüssen in der aktuellen Vegetationsperiode determiniert und weniger durch das im Vorjahr erzielte Wachstum. Demgegenüber finden sich bei den 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.

Im den folgenden Kapiteln werden die Wachstumsparameter zu den Standorten und in Beziehung zueinander gesetzt, und damit ein Vergleich des Zuwachsverhalten des Baumarten ermöglicht.

4.2.1 Beziehungen der Standortchronologien untereinander

Um den Zusammenhang zwischen indexierten Standortchronologien sichtbar zu machen, wurde die Darstellung einer Korrelationsmatrix gewählt. In Abbildung 14 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 Muster zeigen eine klare Konformität (orange Felder) der Wachstumsmuster von Spitz-Ahorn, Rot-Buche sowie Ahornblättriger Platane. Im Vergleich der Lindenarten bzw. der Kultur-Birne mit den restlichen Baumarten ergeben sich in der Mehrzahl der Fälle keine signifikanten Zusammenhänge (weiße Felder).

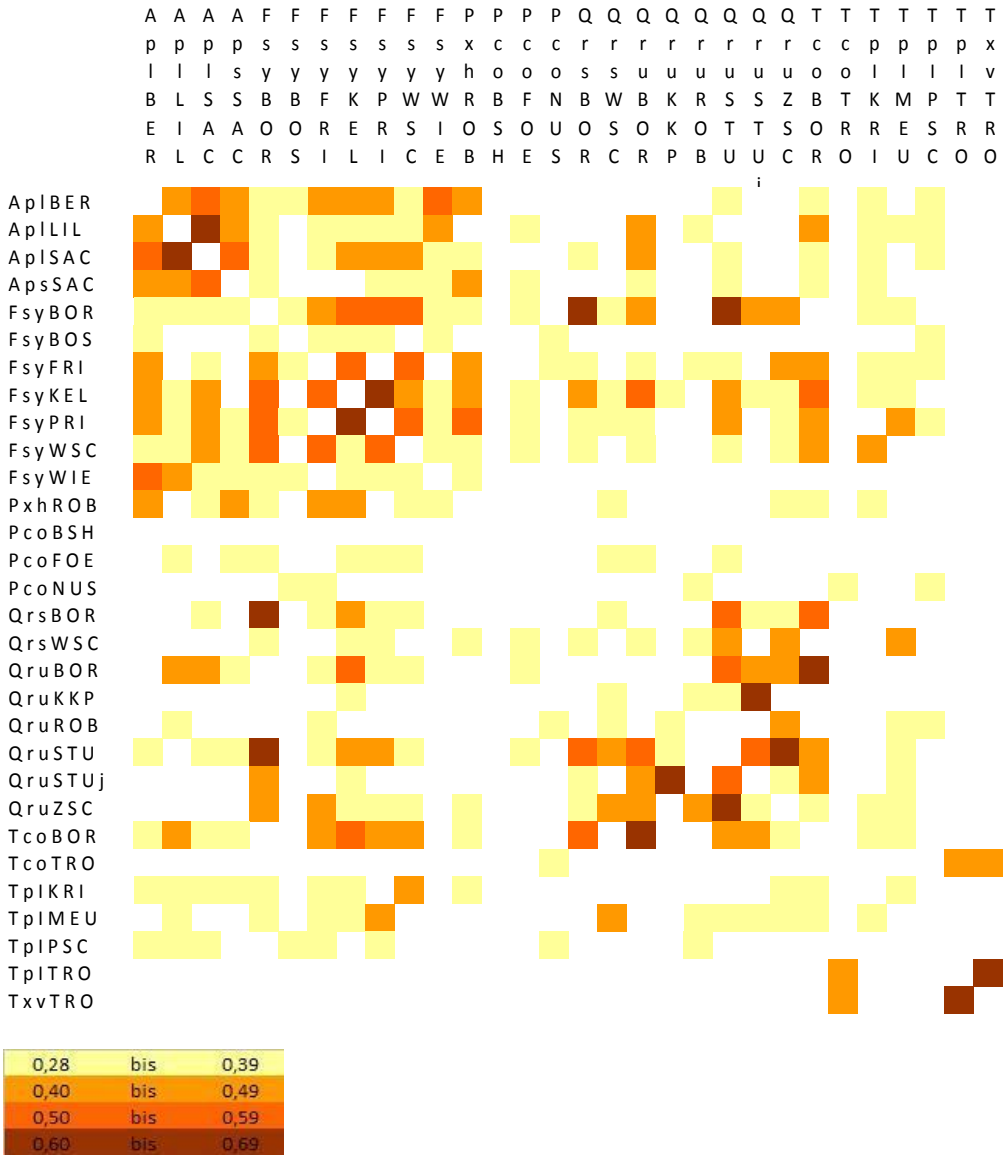


Abbildung 14 Korrelationsmatrix zwischen den Standortchronologien über dem jeweiligen Überlappungszeitraum auf dem 95%-Signifikanzniveau (farbige Felder). Angaben zu den Korrelationskoeffizienten und den genutzten Farben unterhalb der Matrix. Übersicht über die verwendeten Abkürzungen für die Arten und Standorte in Tabelle 4 (S. 30).

Im Standortsvergleich zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den jeweiligen Standortchronologien der Rot-Buchen, der Eichen- sowie Ahornarten untereinander. 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. Die drei Chronologien der Kultur-Birnen (PcoBSH, PcoFOE, PcoNUS) haben dagegen nur geringe Übereinstimmungen im Zuwachsverhalten mit den übrigen Standorten und

Arten. Auch für die Lindenarten, besonders die der Tronitzer Straße, findet sich eine geringere Anzahl signifikanter Übereinstimmungen zu den übrigen Standortchronologien.

Zur weiteren Prüfung der Ähnlichkeit hinsichtlich des Zuwachses, der Mittleren Sensitivität und der Autokorrelation zwischen den Arten und Standorten wurden diese Parameter mittels einer Hauptkomponentenanalyse miteinander verglichen (Abbildung 15).

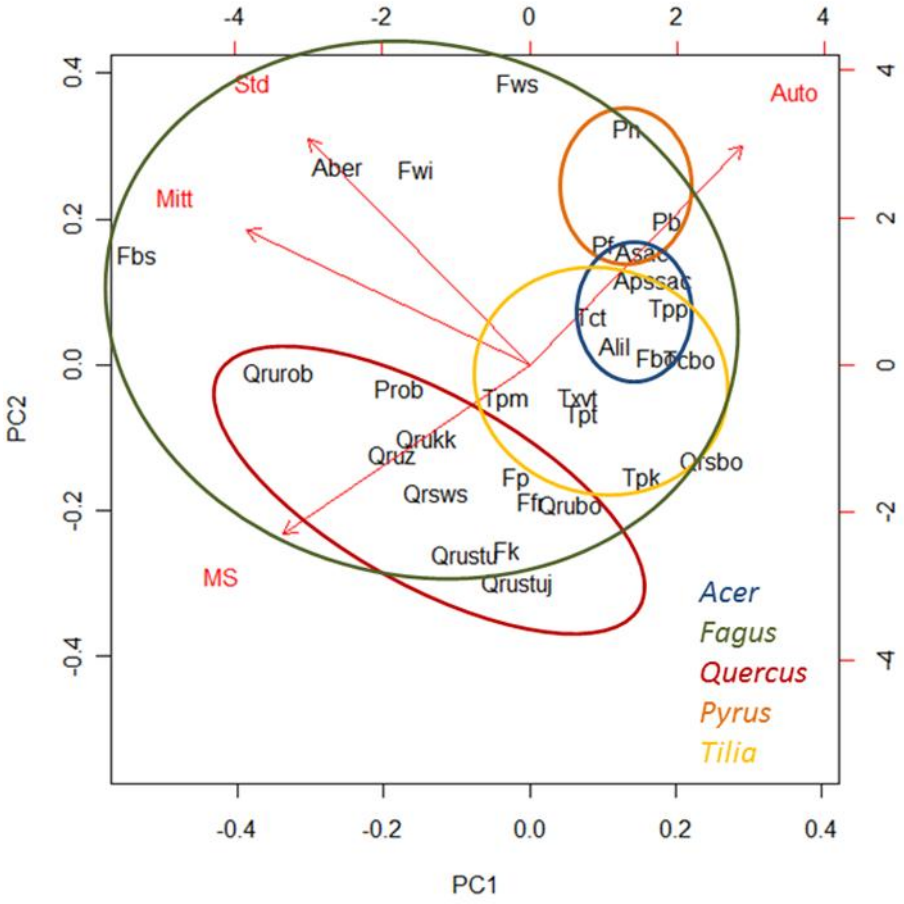


Abbildung 15 Graphische Darstellung der Hauptkomponentenanalyse hinsichtlich des durchschnittlichen jährlichen Radialzuwachses (Mitt), dessen Standardabweichung (Std) sowie der mittleren Sensitivität (MS) und der Autokorrelation (1. Ordnung) der standardisierten Zeitreihen vor der autoregressiven Modellierung. Die farbigen Kreise begrenzen Gruppen gleicher Gattungen unterschiedlicher Standorte. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurden die Abkürzungen der Arten und Standorte nochmals soweit wie möglich verkürzt.

Mit Hilfe der ersten beiden Hauptkomponenten (PC1 und PC2) lassen sich 91% der Varianz erklären. Aus diesem Grund wurde die Darstellung in Form eines zweidimensionalen Streudiagramms gewählt, in der nur die ersten beiden Hauptkomponenten abgebildet sind (Abbildung 15). Es wird deutlich, dass beide betrachteten Eichenarten hinsichtlich ihrer Autokorrelation und Sensitivität eine geringe interne Streuung aufweisen (rote Ellipse) und sich nur in ihrer Zuwachsleistung sowie der dazu gehörigen Standardabweichung unterscheiden. Bei den restlichen Baumarten kann eine größere Streuung dieser Parameter beobachten werden. Trotzdem lassen sich auch für die Ahorn- (blaue Ellipse) und Lindenarten (gelbe Ellipse) sowie für die Kultur-Birne (orange Ellipse) und die Rot-Buche (grüne Ellipse) Areale mit einer hohen Anzahl von Standortchronologien der gleichen Art abgrenzen,

die nahe im Diagramm beieinander liegen und damit ähnliche Werte der entsprechenden Parameter aufweisen. Die größte interne Streuung findet sich bei der Baumart Rot-Buche (Abkürzung F), deren Standortchronologien in der Darstellung zum Teil weit auseinander liegen (vgl. Fbs und Fk). Dennoch kann für die Chronologien der Waldbäume der Rot-Buche (Fbo, Ffr, Fk, Fp) eine hohe Ähnlichkeit der Wachstumsparameter ermittelt werden. Ebenso wie schon in der Korrelationsmatrix bestimmt werden konnte, 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 16 sind die aufgenommenen Standortsparameter der 20 Straßenbaumstandorte in einem Balkendiagramm veranschaulicht. Je geringer die Versiegelungsstufe nach RENGER (1993) bzw. der Versieglungsgrad 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.

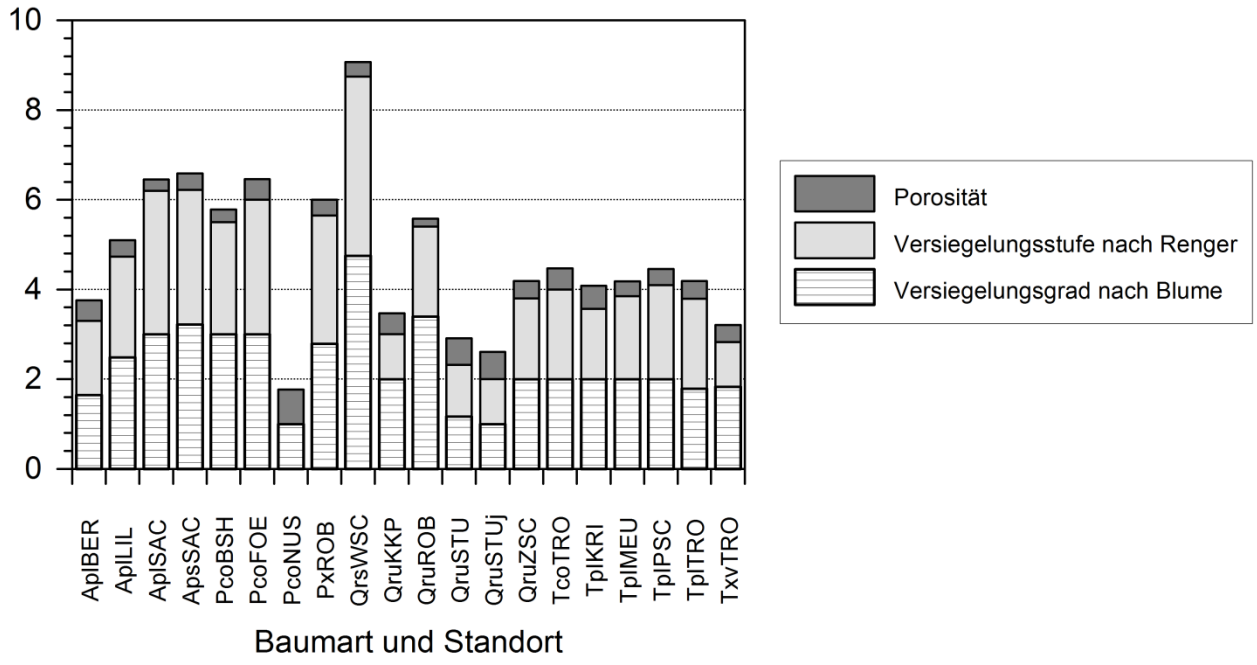


Abbildung 16 Mittlere Porosität (Werte zwischen 0 und 1), Versiegelungsstufe nach RENGER (1993), Versieglungsgrad nach BLUME (1993) der urbanen Standorte

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 (Abbildung 17). 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 befinden 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 (Abbildung 17).

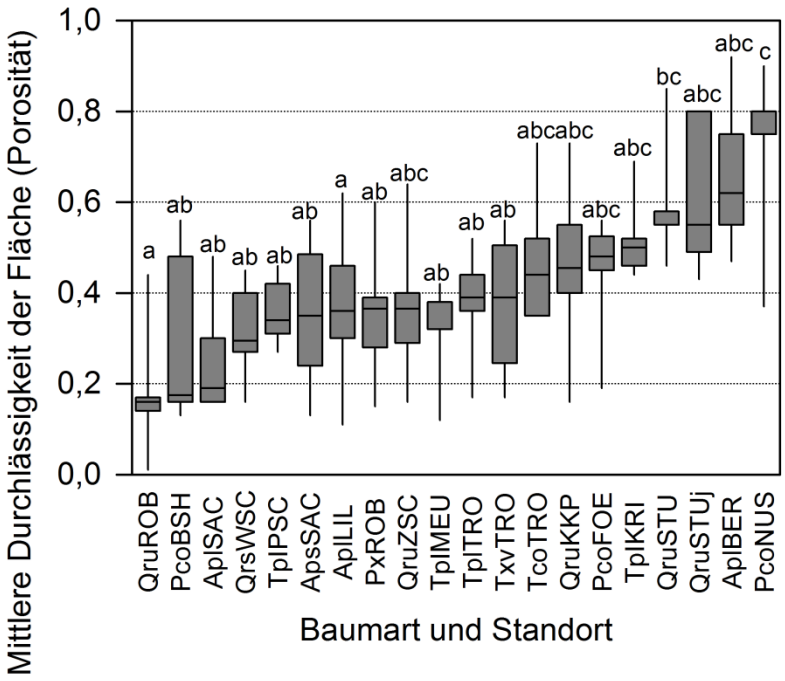


Abbildung 17 Darstellung der mittleren Durchlässigkeit (Porosität) der Straßenbaumstandorte mit mehr als 6 Bäumen pro Straße (sortiert nach aufsteigendem Median). Box-Whisker-Plots mit unterschiedlichen Buchstaben oder Buchstabenkombinationen unterschieden sich auf dem 95%-Signifikanzniveau.

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 6 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 6 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
A p l B E R	-0,09	-0,05	0,03	-0,10	-0,55
A p l L I L	-0,20	0,11	0,21	-0,01	-0,19
A p l S A C	**0,37**	**0,45**	-0,03	0,08	-0,42
A p s S A C	0,25	-0,17	0,28	0,30	-0,09
P c o B S H	0,45	**0,60**	**0,61**	-0,17	0,29
P c o F O E	-0,17	-0,34	-0,21	**0,84**	-0,47
P c o N U S	-0,04	-0,07	0,01	**0,28**	-0,17
P x h R O B	**0,69**	0,09	-0,16	-0,18	-0,32
Q r s W S C	0,01	-0,22	-0,26	-0,57	0,01
Q r u K K P	0,03	-0,08	0,16	0,09	0,03
Q r u R O B	0,10	-0,04	0,34	0,08	0,23
Q r u S T U	-0,21	-0,22	-0,20	-0,21	0,02
Q r u S T U j	-0,10	0,19	**0,50**	-0,08	0,15
Q r u Z S C	0,14	-0,24	-0,30	-0,02	-0,22
T c o T R O	-0,32	-0,30	-0,46	0,12	-0,10
T p l K R I	-0,11	-0,27	-0,19	**0,54**	-0,30
T p l M E U	-0,38	-0,39	-0,16	-0,23	0,04
T p l P S C	0,26	0,00	0,20	-0,19	0,21
T p l T R O	0,24	0,10	0,03	-0,05	0,11
T x v T R O	-0,37	0,04	0,05	0,20	0,07

4.3 Klima und Zuwachs

Im folgenden Kapitel werden die Einflüsse der Temperatur und des Niederschlags auf das artspezifische Wachstum in Balkendiagrammen dargestellt. Die 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. Am Ende des Kapitels sind die signifikanten Korrelationskoeffizienten zur Identifikation des

vorrangigen Witterungseinflusses noch einmal tabellarisch für jede Masterchronologie zusammengefasst dargestellt.

In Abbildung 18 sind die Klima-Zuwachs-Relationen für den **Spitz-Ahorn** illustriert. Übereinstimmend für diese Baumart konnte auf allen Standorten eine Abhängigkeit der Radialzuwächse von den Temperaturen im Vorjahres-Juli sowie im Juni des aktuellen Jahres und zu den Niederschlägen im Vorjahres-September 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. Im Gegensatz zu den Spitz-Ahornen des wenig versiegelten Straßenbaumstandortes der Berchtesgadener Straße (AplBER), für die die Witterungsbedingungen im aktuellen Juni (Temperatur r = -0,41; Niederschlag r = 0,38) entscheidend sind, zeigen die Bäume der beiden Standorte geringer Porosität die stärkste Abhängigkeit zu den Witterungsbedingungen im Vorjahr. Die signifikante Korrelation zu den Vorjahres-Dezember Temperaturen und die starke Bedeutung der Niederschläge im aktuellen Jahr für den Zuwachs auf der Berchtesgadener Straße (BER), stellen weitere Unterschiede zu den beiden Ahorn-Standorten der Lilienthalstraße und der Sachsenwerkstraße dar.

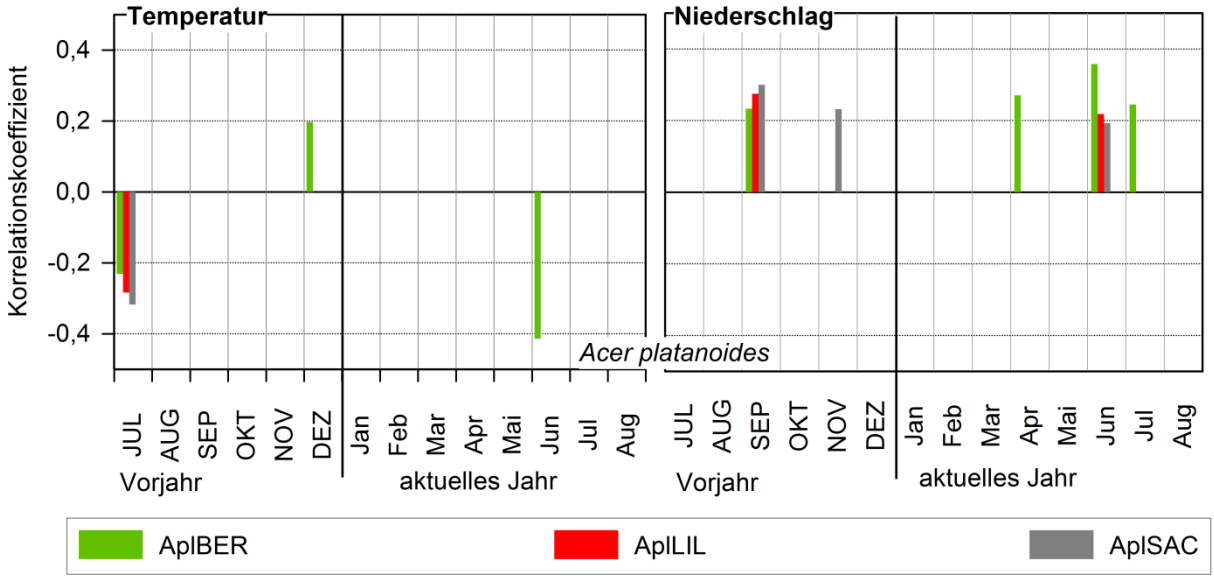


Abbildung 18 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Spitz-Ahorn (Apl) für die Standorte Berchtesgadener Straße (BER), Lilienthalstraße (LIL) sowie Sachsenwerkstraße (SAC).

Die klimatische Abhängigkeit des **Berg-Ahorns** ist primär durch die Niederschläge im Zeitraum Mai bis Juli des aktuellen Jahres gegeben (Abbildung 19). Hohe Niederschläge in diesem Zeitraum wirken sich in einem hohen Zuwachs aus, wobei den Niederschlagsmengen im aktuellen Juni die höchste Bedeutung zukommt (r = 0,32). Ein statistisch nachweisbarer Einfluss der Temperatur auf die Zuwachszeitreihe ist nur im Juli des Vorjahres gegeben. Hier wurde ein negativer Korrelationskoeffizient von r = 0,31 berechnet.

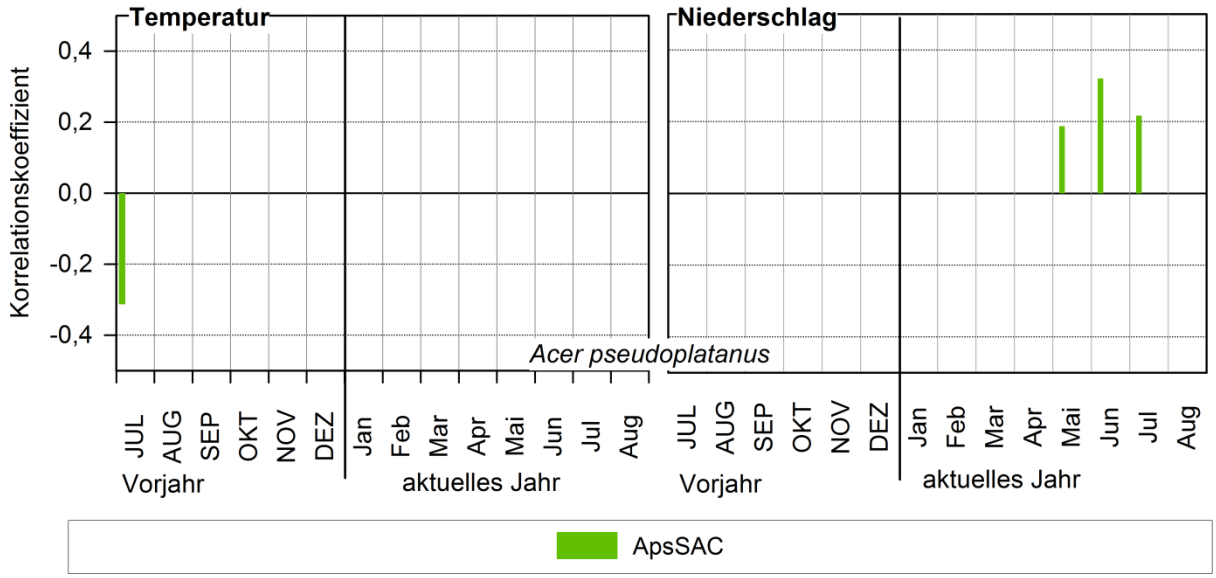


Abbildung 19 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Berg-Ahorn (Aps) für den Standort Sachsenwerkstraße (SAC).

Die Klima-Zuwachs-Relation für die Baumart **Rot-Buche** wurde für Waldbäume (Abbildung 20) und Stadtbäume (Abbildung 21) getrennt dargestellt, da diese unterschiedlichen Standortstypen eine ungleiche Belegung der Chronologien aufweisen und an dieser Stelle das Hauptanliegen auf die vergleichende Beschreibung innerhalb der beiden Standortstypen Wald und Stadt gerichtet werden soll. 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. Weiterhin wurden jeweils zwei trockene (BOR, KEL) und zwei frische-feuchte Waldstandorte (FRI, PRI) gegenübergestellt, um mögliche Unterschiede im Reaktionsverhalten hinsichtlich der Bodenfeuchte zu erkennen.

Grundsätzlich wurde für die trockenen Waldstandorte eine stärkere klimatische Abhängigkeit als für die frischen Waldstandorte ermittelt. Dies zeigt sich in den höheren Korrelationskoeffizienten. So findet sich die stärkste Abhängigkeit für die trockene Fläche des Borsberges (FsyBOR) zu den Niederschlägen im Juni des aktuellen Jahres (r = 0,44). Im gleichen Monat wurde auch der höchste Korrelationskoeffizient der frischen Flächen für die Rot-Buchen des Prießnitzwasserfalls (FsyPRI) ermittelt. Allerdings liegt dieser lediglich bei r = 0,29. Für die trockenen Standorte lassen sich zwei Perioden eingrenzen, in denen das Witterungsgeschehen von vorrangiger Bedeutung ist. Im Vorjahr sind die Temperaturen und Niederschläge von Juli bis September und im aktuellen Jahr von April bis Juni signifikant zuwachsprägend. Hohe Temperaturen, die mit niedrigen Niederschlägen einhergehen äußern sich in diesen Perioden in einem geringen Radialzuwachs. Interessant für die frischen-feuchten Buchenstandorte sind die negativen Temperaturkorrelationen im Vorjahresseptember und die darauffolgende positive Korrelation im Oktober. Ein weiterer markanter Unterschied zeigt sich in der Zuwachsabhängigkeit der Bäume von den Wintertemperaturen im Januar und Februar in Form

von signifikant positiven Korrelationen. Mit einer Ausnahme für die Rot-Buchen des Prießnitzwasserfalls (FsyPRI) im Monat September sind die Niederschläge im Vorjahr für die frischen bis feuchten Standorte für den Radialzuwachs von geringer, statistisch nicht nachweisbarer Bedeutung.

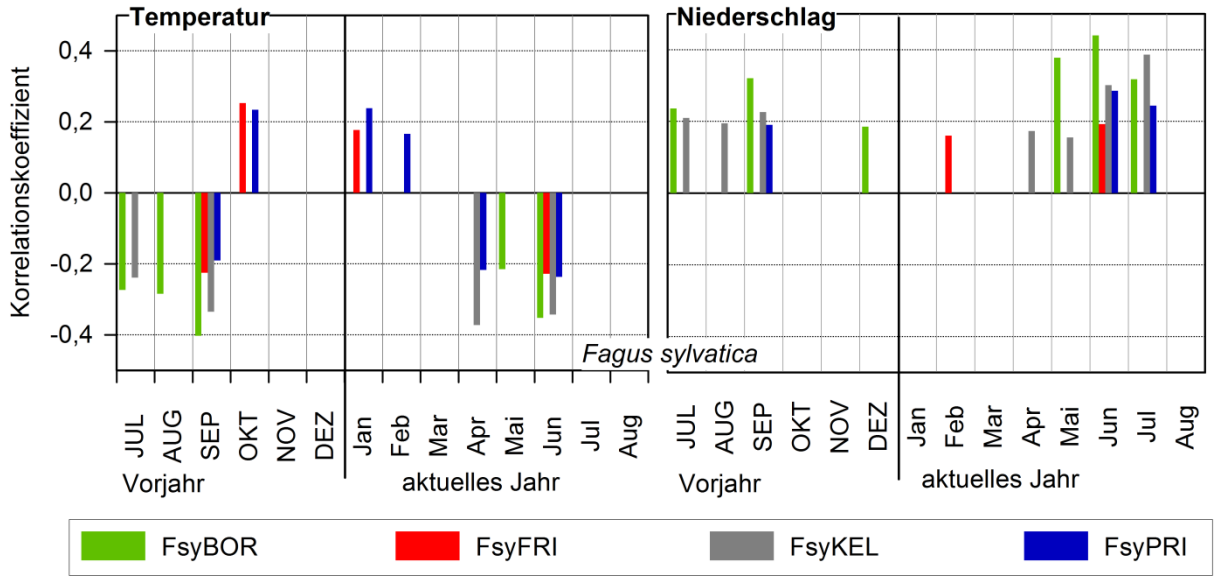


Abbildung 20 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Rot-Buche (Fsy) für die trockenen Waldstandorte Borsberghänge (BOR) sowie Kellerbrücke (KEL) und die frischen bis feuchten Waldstandorte Friedrichsgrund (FRI) und Prießnitzwasserfall (PRI).

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 (Abbildung 20). Dies zeigt sich besonders auf dem Standort Bosewitzer Straße (FsyBOS), auf dem signifikante Zusammenhänge einzig für die Niederschläge im Vorjahres August und im aktuellen Juli bestehen. Insgesamt sind für die städtischen Buchen die Zuwächse am häufigsten mit den Niederschlägen in der laufenden Vegetationsperiode von Mai bis Juli korreliert.

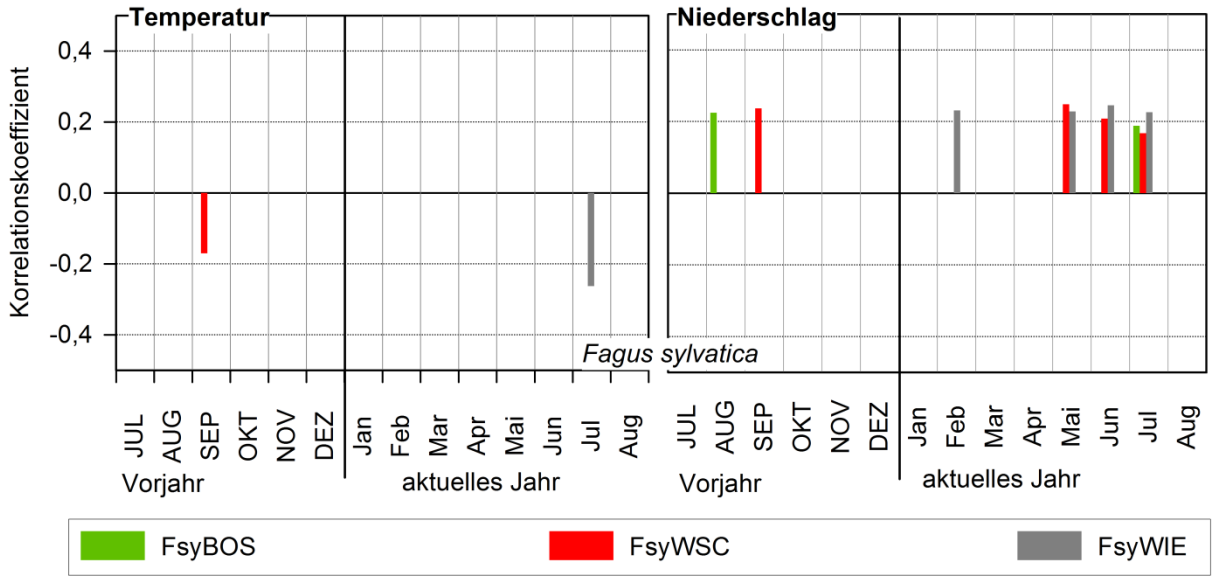


Abbildung 21 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Rot-Buche (Fsy) für die drei städtischen Einzelbaumstandorte Bosewitzer Straße (BOS), Waldschlösschenstraße (WSC) und Wiener Straße (WIE).

Für die **Ahornblättrige Platane** in Abbildung 22 konzentriert sich der Temperatureinfluss auf den Zuwachs in den Vorjahresmonaten von Juli bis September. Im Jahr der Ringbildung ist einzig die Temperatur im Februar, hier positiv, mit dem Radialzuwachs korreliert. Der Niederschlag steht mit dem Zuwachs stets in einer positiven Wechselbeziehung, die am stärksten im Juli (r = 0,38) des aktuellen Jahres ist.

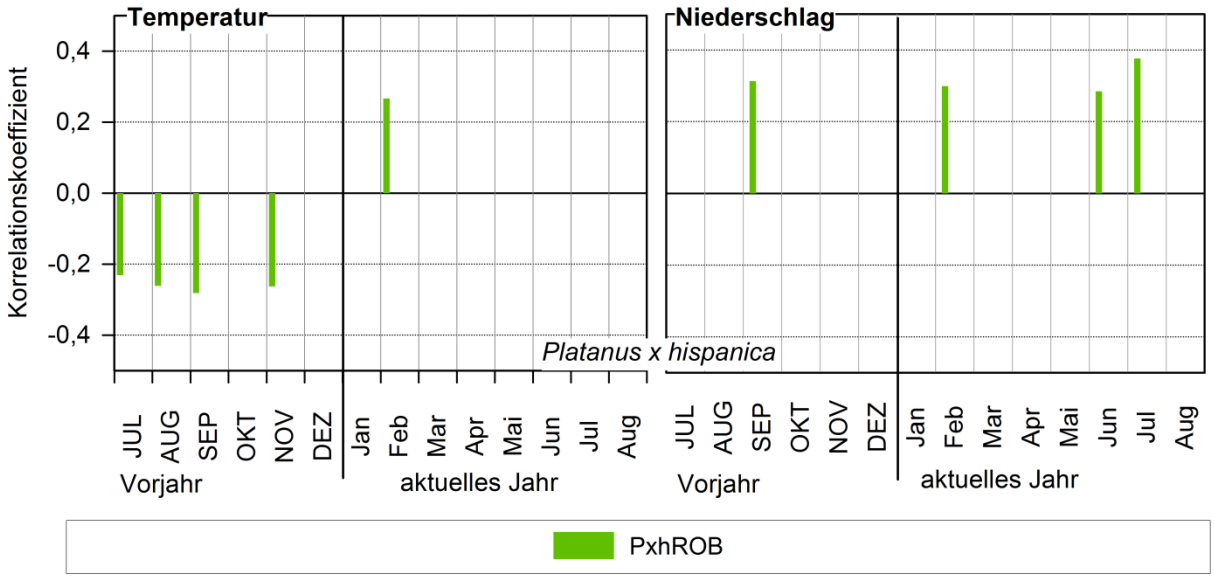


Abbildung 22 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Ahornblättrigen Platane (Pxh) für die Robert-Berndt-Straße (ROB).

Die klimatischen Wirkungszusammenhänge für die **Kultur-Birne** ergeben kein klares Bild, so dass nur wenige Gemeinsamkeiten zwischen den drei Standortchronologien bestehen (Abbildung 23). Einige

Übereinstimmungen ergeben sich für die Bäume in den negativen Beziehungen von Temperatur und Zuwachs in den Monaten Juli bis September des Vorjahres.

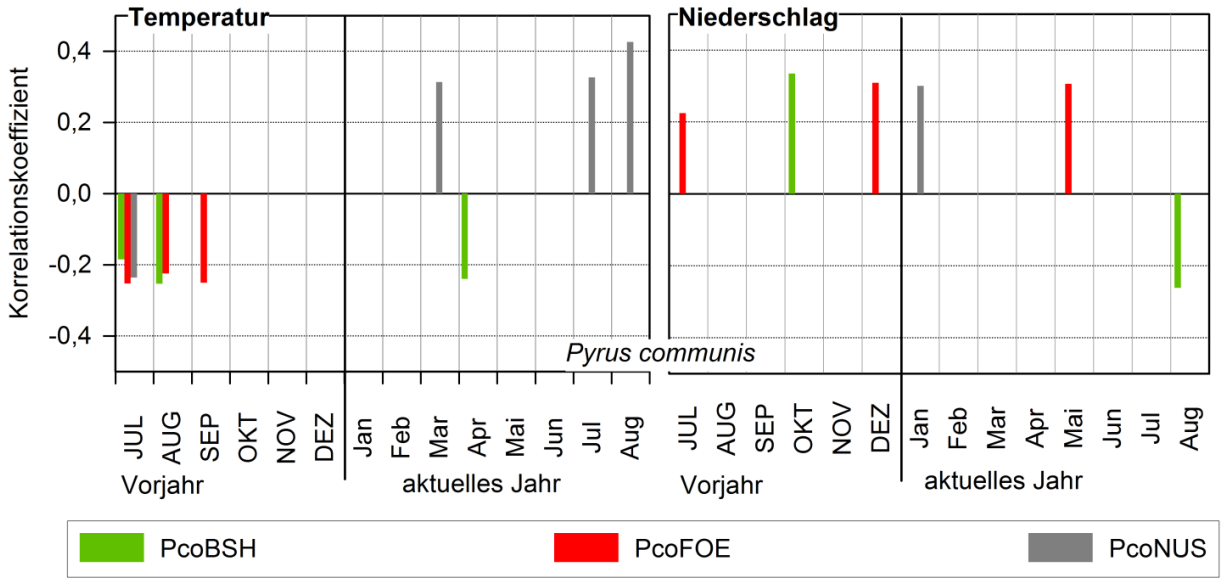


Abbildung 23 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Kultur-Birne (Pco) für die Standorte Bernard-Shaw-Straße (BSH), Försterlingstraße (FOE) und Nussallee (NUS).

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. Für die anderen Baumarten konnte stets ein höherer Anteil negativer Korrelationen zwischen Temperatur und Zuwachs im aktuellen Sommer festgestellt werden. Nur für die Kultur-Birnen der Nussallee bewirken hohe Temperaturen einen hohen Radialzuwachs. In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, dass die Nussallee gleichzeitig die geringste Versiegelung mit der höchsten Porosität aufweist, und die Bernard-Shaw-Straße die zweit geringste Porosität aller städtischen Straßenbaumstandorte zeigt.

Auf den trockenen Borsberghängen reagieren die **Trauben-Eichen** auf hohe Temperaturen im Vorjahresseptember und in der laufenden Vegetationsperiode von April bis Juni mit einem geringen Zuwachs (Abbildung 24). Dagegen bewirken hohe Niederschlagsmengen im August sowie Oktober des Vorjahres und wiederum von April bis Juni im aktuellen Jahr einen hohen Zuwachs. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,45 zeigen die Trauben-Eichen des Waldstandortes die stärkste Abhängigkeit von den Juni-Niederschlägen.

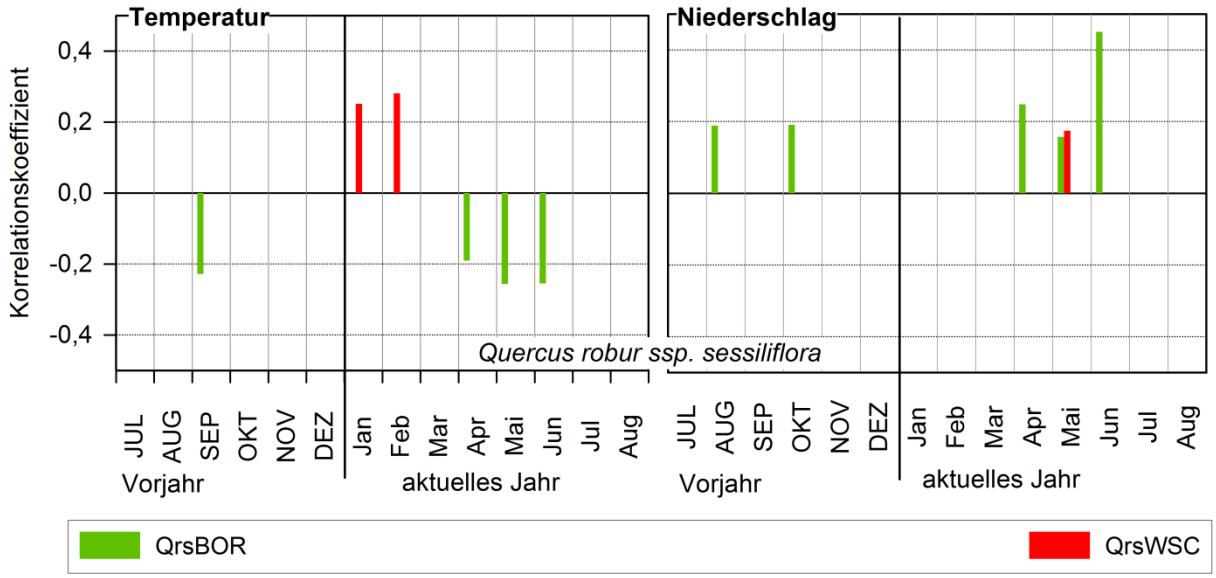


Abbildung 24 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Trauben-Eiche (Qrs) für den urbanen Standort Waldschlösschenstraße (WSC) sowie den Waldstandort Borsberghänge (BOR).

Ein konträres Bild der Klima-Zuwachs Relation zeigen die Bäume 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 Beziehung zu den Niederschlägen, korrelieren nur die Niederschlagsmengen im Mai des aktuellen Jahres signifikant zum Zuwachs.

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse für die **Rot-Eiche** gegenübergestellt. Auch für diese Baumart konnte eine grundsätzlich stärkere klimatische Steuerung des Radialzuwachses der Waldbäume als für die Stadtbäume festgestellt werden, worauf die hohen Korrelationskoeffizienten im Juli bis September (r = -0,42) des Vorjahres und der laufenden Vegetationsperiode für den Standort Borsberg (QruBOR) verweisen. Hinsichtlich der Zeiträume des Vorjahreseinflusses ergeben die Analysen für die Stadtbäume ein ähnliches Bild wie für die Bäume des Waldstandortes. 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. Die urbanen Chronologien lassen 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. Die geringste Klimasensitivität für die Rot-Eichen besteht auf der Robert-Berndt-Straße (ROB), mit signifikanten Zusammenhängen in nur zwei Monaten. Dieser Straßenbaumstandort weist auch die geringste Porosität aller Standorte auf und weicht damit stark von den Standortsbedingungen der restlichen Standorte ab (vgl. Abb. 17)

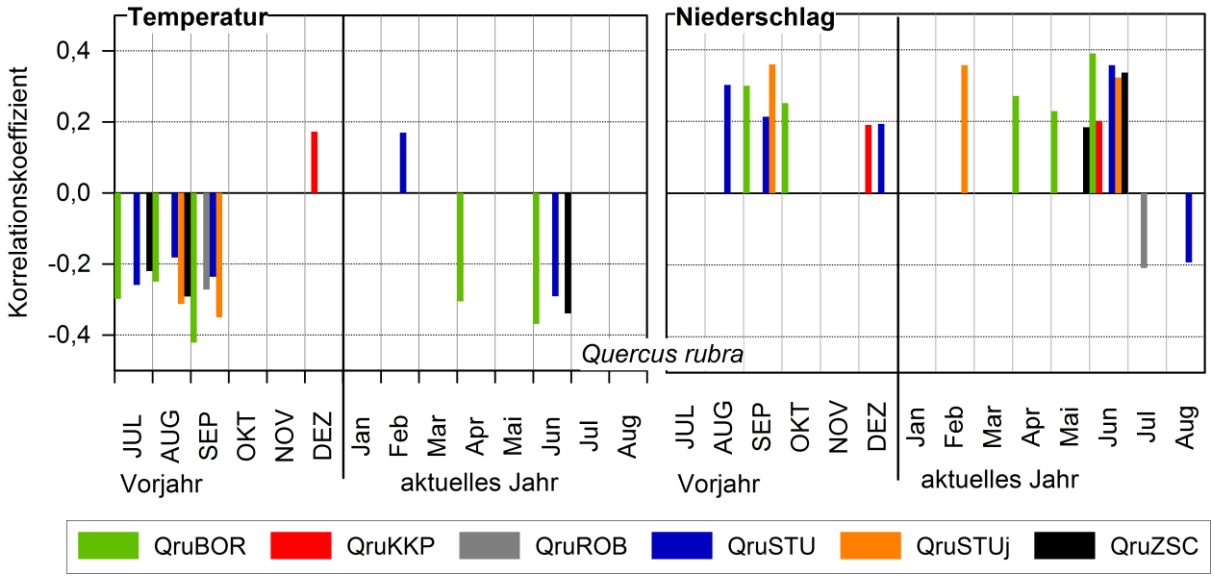


Abbildung 25 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Rot-Eiche (Qru) der urbanen Standorte Käthe-Kollwitz-Platz (KKP), Robert-Berndt-Straße (ROB), Stübelallee (STU), Stübelallee (STUJ), Zschierener Straße (ZSC) sowie den Waldstandort Borsberghänge (BOR).

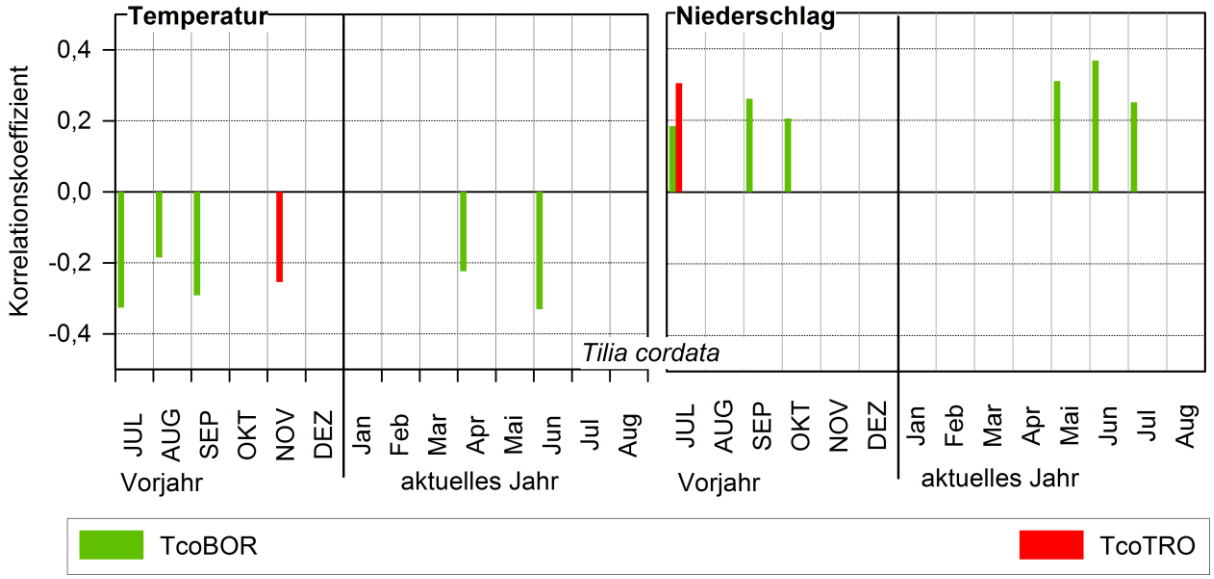


Abbildung 26 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Winter-Linde (Tco) des urbanen Standortes Tronitzer Straße (TRO) und des Waldstandortes Borsberghänge (BOR).

Die klimatische Abhängigkeit für die **Winter-Linde** der Stadt- und Waldstandorte ist in Abbildung 26 dargestellt. Auch hier werden die bisherigen Ergebnisse bestätigt: die klimatische Zuwachssteuerung ist stärker bei den Waldbäumen (TcoBOR) als bei den städtischen Bäumen (TcoTRO) ausgeprägt. Die Waldbäume zeigen eine Zuwachsabhängigkeit von den Vorjahrestemperaturen im Zeitraum Juli bis September sowie zu den Vorjahresniederschlägen im September und Oktober. 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). Die Stadtbäume zeigen nur in zwei Fällen eine signifikante Klimaabhängigkeit des Wachstums. Neben der negativen Korrelation zu den November-Temperaturen im Vorjahr sind nur noch Juli-Niederschläge im Vorjahr für den Zuwachs bedeutend.

Obwohl die Standortbedingungen der **Sommer-Linden** der vier Standorte vergleichbar sind (vgl. Abb. 16 und 17), zeigen sich nur wenige Übereinstimmungen und insgesamt schwache klimatische Relationen zum Zuwachs (Abbildung 27). Dennoch kann für mindestens drei der vier Standorte übereinstimmend die Temperatursteuerung im Juni im Jahr der Ringbildung und eine signifikante Niederschlagswirkung im September des Vorjahres festgestellt werden.

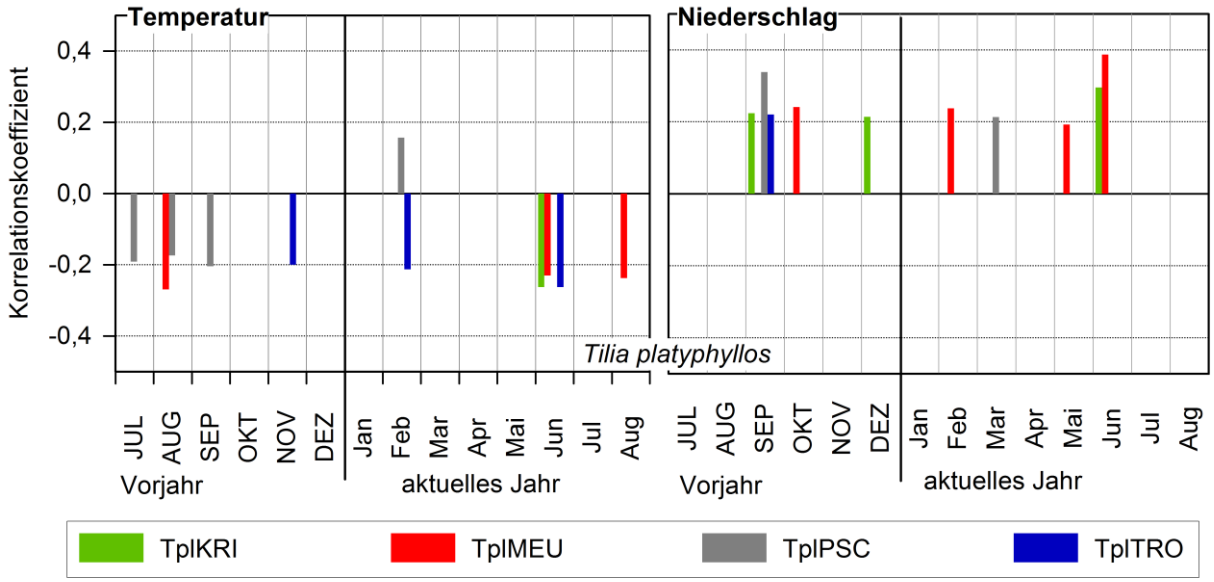


Abbildung 27 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur sowie Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Sommer-Linde (Tpl) der urbanen Standorte Krippener Straße (KRI), Meußlitzer Straße (MEU), Peter-Schmoll-Straße (PSC) sowie Tronitzer Straße (TRO).

Zudem determinieren für die Bäume auf der Meußlitzer Straße (MEU) (r = 0,39) und der Krippener Straße (KRI) (r = 0,30) die Niederschlagsmengen im Juni den Zuwachs am stärksten. Im Gegensatz zu vielen anderen hier untersuchten Baumarten zeigt die Sommer-Linde auf der Tronitzer Straße (TRO) eine negative Korrelation zu den Februar-Temperaturen.

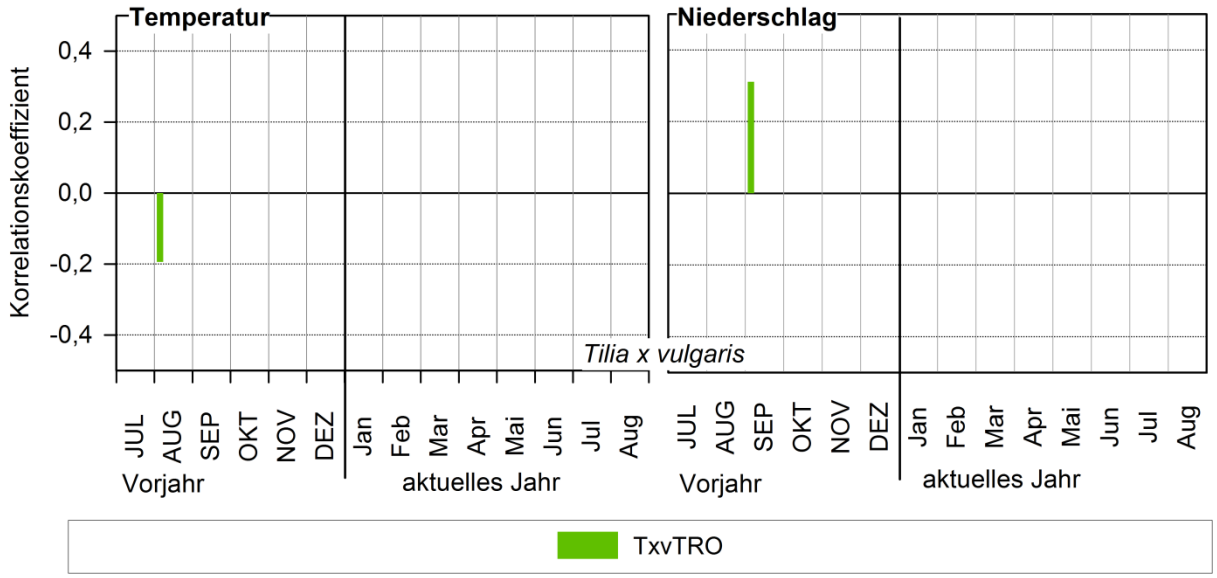


Abbildung 28 Signifikante Korrelationskoeffizienten zwischen den indexierten Zuwachszeitreihen und Temperatur und Niederschlag vom Vorjahres-Juli bis August des aktuellen Jahres für Holländische Linde (Txp) des urbanen Standortes Tronitzer Straße (TRO).

Die Ergebnisse für die **Holländische Linde** auf der Tronitzer Straße (Abb. 28) ähneln denen der Winter-Linde am gleichen Standort (vgl. Abb. 26). So zeigen sich nur zwei signifikanten Einflüsse, die alle im Vorjahr der Ringbildung zu finden sind. Damit kann die Baumart geringe Temperaturen im August und hohe Niederschläge im September des Vorjahres für einen guten Zuwachs im aktuellen Jahr nutzen.

In den folgenden beiden Tabellen 7 und 8 sind die Korrelationskoeffizienten der Klima-Zuwachsbeziehungen für alle Chronologien noch einmal zusammengefasst. Für die Mehrzahl der untersuchten Baumarten lässt sich deutlich erkennen, dass den Temperaturen im Vorjahr in der Periode von Juli bis September und im aktuellen Juni für das Wachstum die größte Bedeutung zukommt (Tab. 7). 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 (AplBER), allein auf die Temperaturen im Juli des Vorjahres reagieren, konnte für die Buchen sowohl ein verstärkter Vorjahreseinfluss im September als auch im Juni im Jahr der Ringbildung analysiert werden. Die Waldbäume der Rot-Buche (Fsy), der Rot-Eiche (Qru) und der Winter-Linde (Tco) des Standortes Borsberg (BOR) zeichnen sich durch eine starke, hohe Temperaturabhängigkeit im gesamten Vorjahreszeitraum von Juli bis September aus, während die Temperaturen in der aktuellen Vegetationsperiode nur in ein bis zwei Monaten negativ mit dem Zuwachs korrelieren. Diesem Ergebnis steht die höhere Bedeutung der Temperaturen von April bis Juni im Jahr der Ringbildung für die Trauben-Eichen des Borsberges (QrsBOR) gegenüber.

Tabelle 7 Zusammenfassung sämtlicher signifikanter Temperatureinflüsse aus den Korrelationsanalysen (Korrelationskoeffizienten).

Art und Standort	Vorjahr						aktuelles Jahr							
	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
AplBER	-0,23					0,20						-0,41		
AplLIL	-0,28													
AplSAC	-0,32													
ApsSAC	-0,31													
FsyBOR	-0,27	-0,28	-0,40								-0,21	-0,35		
FsyFRI			-0,23	0,25			0,18					-0,23		
FsyKEL	-0,24		-0,33							-0,37		-0,34		
FsyPRI			-0,19	0,23			0,24	0,17		-0,22		-0,24		
FsyBOS														
FsyWSC			-0,17											
FsyWIE													-0,26	
PxhROB	-0,23	-0,26	-0,28		-0,26			0,27						
PcoBSH	-0,18	-0,25								-0,24				
PcoFOE	-0,25	-0,22	-0,25											
PcoNUS	-0,24								0,31				0,33	0,43
QrsBOR			-0,23							-0,19	-0,26	-0,25		
QrsWSC							0,25	0,28						
QruBOR	-0,30	-0,25	-0,42							-0,31		-0,37		
QruKKP						0,17								
QruROB			-0,27											
QruSTU	-0,26	-0,18	-0,24					0,17				-0,29		
QruSTUj		-0,31	-0,35											
QruZSC	-0,22	-0,29										-0,34		
TcoBOR	-0,33	-0,18	-0,29							-0,22		-0,33		
TcoTRO					-0,25									
TplKRI												-0,26		
TplMEU		-0,27										-0,23		-0,24
TplPSC	-0,19	-0,17	-0,20					0,16						
TplTRO					-0,20			-0,21				-0,26		
TxvTRO		-0,19												

Wie schon aus den Abbildungen 25 und 26 ersichtlich, weisen die Sommer-Linden und die Holländische Linde die geringste Temperaturabhängigkeit des Wachstums aller untersuchten Baumarten auf. 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. Insgesamt reagieren die Waldbäume stärker auf die Temperaturen als die Stadtbäume.

Für die Abhängigkeit des Wachstums von den Niederschlagsmengen lassen sich häufig stärkere Zusammenhänge in der laufenden Vegetationsperiode von April bis Juli erkennen. Für das Vorjahr zeigen die Niederschlagsmengen im Monat September vielfach den höchsten Einfluss auf den Zuwachs im Folgejahr. Bis auf drei Ausnahmen (PcoBSH, QruROB, QruSTU) für die Monate Juli sowie August sind hohe Zuwächse grundsätzlich an überdurchschnittliche Niederschlagsmengen gekoppelt.

Tabelle 8 Zusammenfassung sämtlicher signifikanter Niederschlagseinflüsse aus den Korrelationsanalysen Korrelationskoeffizienten)

Art und	Vorjahr						aktuelles Jahr							
Standort	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
AplBER			0,23							0,27		0,36	0,24	
AplLIL			0,27									0,22		
AplSAC			0,30		0,23							0,19		
ApsSAC											0,19	0,32	0,22	
FsyBOR	0,24		0,32			0,19					0,38	0,44	0,32	
FsyFRI								0,16				0,19		
FsyKEL	0,21	0,19	0,23							0,17	0,16	0,30	0,39	
FsyPRI			0,19									0,29	0,24	
FsyBOS		0,22											0,19	
FsyWSC			0,24								0,25	0,21	0,17	
FsyWIE								0,23			0,23	0,25	0,23	
PxhROB			0,31					0,30				0,28	0,38	
PcoBSH				0,33										-0,26
PcoFOE	0,22					0,31					0,31			
PcoNUS							0,30							
QrsBOR		0,19		0,19						0,25	0,16	0,45		
QrsWSC											0,17			
QruBOR			0,30	0,25						0,27	0,23	0,39		
QruKKP						0,19						0,20		
QruROB													-0,27	
QruSTU		0,30	0,21			0,19						0,36		-0,19
QruSTUj			0,36					0,36				0,32		
QruZSC											0,18	0,34		
TcoBOR	0,18		0,26	0,21							0,31	0,37	0,25	
TcoTRO	0,30													
TplKRI			0,22			0,21						0,30		
TplMEU				0,24				0,24			0,19	0,39		
TplPSC			0,34						0,21					
TplTRO			0,22											
TxvTRO			0,31											

Analog zu den Ergebnissen für die Temperatur konnte für die Waldbäume des Borsberges eine stärkere Niederschlagssteuerung festgestellt werden als für die entsprechenden Arten auf den städtischen Standorten. Für alle Waldbaumchronologien des Borsberges korrelieren die Niederschlagsmengen im Juni im Jahr der Ringbildung am stärksten.

Betrachtet man die Monate, in denen eine Niederschlagswirkung auf den Zuwachs nachgewiesen werden kann, können differenzierte Antworten der Baumarten beschreiben werden. So reagiert der der Berg-Ahorns, 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 negative Beziehungen berechnet wurden. Im Gegensatz zu den Analysen für die Temperatur (Tab. 7) weisen die Chronologien der Sommer-Linde zu den Niederschlägen ähnlich hohe Korrelationskoeffizienten wie die restlichen Baumarten auf.

4.3.1 Veränderung der Klima-Zuwachs-Relation

Über die moving correlations kann eine Veränderung der klimatischen Wirkung auf den radialen Zuwachs erfasst werden. Die Zuwachszeitreihen, die weiter als bis zum Jahr 1939 zurückreichen, wurden mit moving intervals der Basislänge von 60 Jahren untersucht. Für kürzere Zeitreihen wurden Basislängen von 30 Jahren verwendet. 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. 29). 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 zu beobachten. Im letzten Abschnitt des Analysezeitraumes liegt der Korrelationskoeffizient bei ca. -0,40. 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.

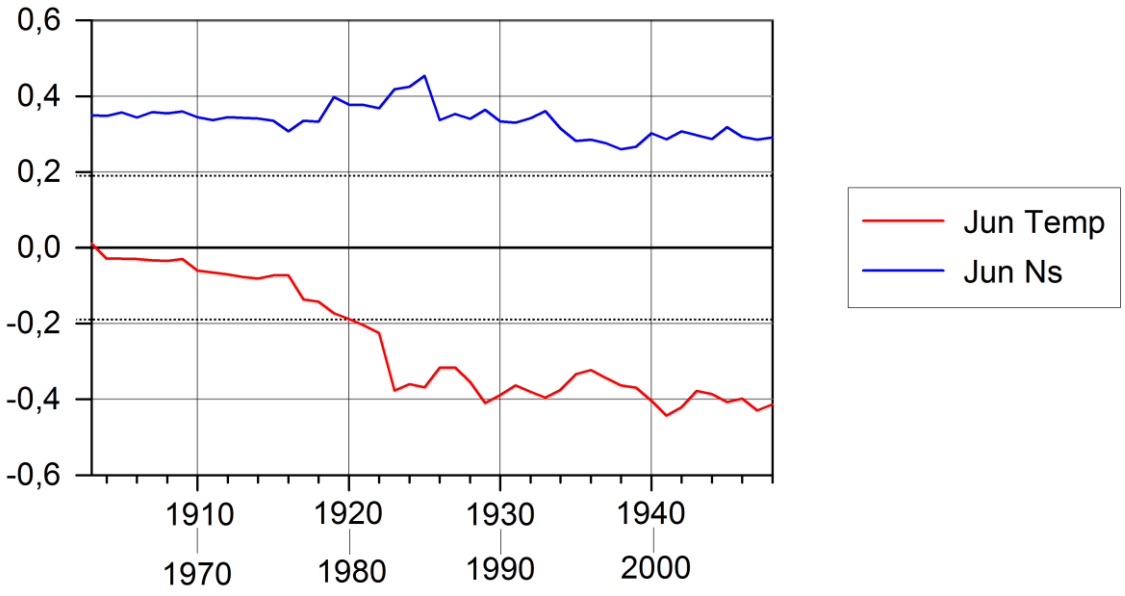


Abbildung 29 'Moving correlations' (Basislänge 60 Jahre) für Berg-Ahorn der Sachsenwerkstraße für Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Linie) im Monat Juni des aktuellen Jahres im Zeitraum 1904 bis 2008. Die gepunktete horizontale Linien markieren die Signifikanzlevel (P < 0.05).

In Abbildung 30 soll beispielhaft für den sinkenden Temperatureinfluss des Dezembers im Vorjahr 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 der 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.

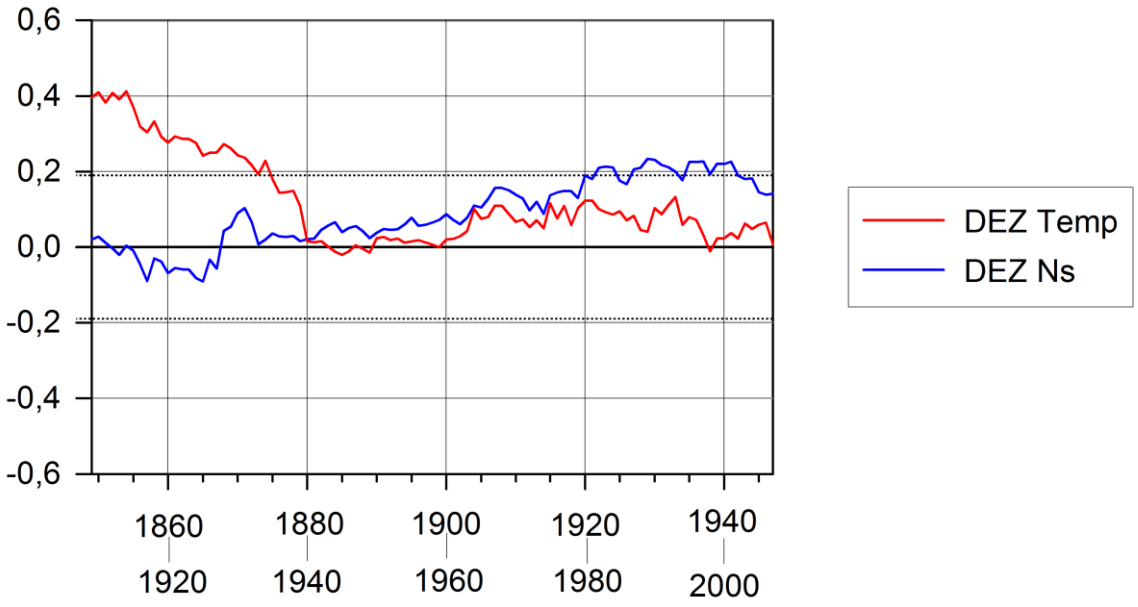


Abbildung 30 'Moving correlations' (Basislänge 60 Jahre) für einen urbanen Einzelbaum der Rot-Buche der Waldschlösschenstraße für Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Linie) im Monat Juni des aktuellen Jahres im Zeitraum 1849 bis 2007. Die gepunktete horizontale Linien markieren die Signifikanzlevel (P < 0.05).

In Tabelle 9 und 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. Für alle Chronologien der **Spitz-Ahorne** zeigen sich übereinstimmend starke Veränderungen der Zuwachsabhängigkeit von den Niederschlägen im Monat September des Vorjahres sowie im Juni des aktuellen Jahres (Tab. 10). Für diese Monate verstärkte sich die Korrelation bis zu einem Koeffizienten von $r < 0,2$, so dass sie bis zum Jahr 2008 für alle drei Chronologien signifikante Einflüsse ausüben. Die Entwicklung der Temperatur-Zuwachs Relationen zeigen weniger einheitliche Veränderungen (Tab. 9.).

Für den **Berg-Ahorn** auf der Sachsenwerkstraße konnte eine gesteigerte Empfindlichkeit des Radialzuwachses sowohl gegenüber der Juli-Temperatur im Vorjahr als auch gegenüber den Juni-Temperaturen im aktuellen Jahr berechnet werden (Tab. 9). Damit erreicht die Korrelation zu den Temperaturen am Ende des Analysezeitraums bis zum Jahr 2008 in beiden Monaten Werte von über 0,4. 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.

Für die **Rot-Buchen** kann eine deutliche Zunahme der negativen Korrelation zu den Vorjahrestemperaturen im August und September sowie zu den Temperaturen im April und Juni des aktuellen Jahres beobachtet werden (Tab. 9). Für die beiden trockenen Waldstandorte bleibt der Niederschlagseinfluss im August/September (FsyBOR) bzw. im Juli/August (FsyKEL) über die Zeit

konstant. Hinsichtlich der Niederschlagsabhängigkeit zeigt sich für die Rot-Buchen des Borsberges die stärkste Veränderung. Hier konnte eine zunehmende Empfindlichkeit der Zuwachswerte von den Niederschlagsmengen im April des aktuellen Jahres berechnet werden. Dagegen zeigt sich auf diesem Standort für die Monate März, Mai und Juni eine gegenläufige Entwicklung. Eine Übereinstimmung ergibt sich für die Tendenz der Korrelation zwischen Zuwachs und Niederschlag für den Monat Juni für die beiden Waldstandorte Kellerbrücke (KEL) und Prießnitz (PRI) sowie für die beiden urbanen Einzelbaumstandorte 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. Für die beiden frischen bis feuchten Waldstandorte (FsyFRI, FsyPRI) zeigt sich eine zunehmende Bedeutung auf den Zuwachs der Temperaturen im Oktober des Vorjahres. Allerdings ist der Zuwachs hier positiv mit der Temperatur korreliert. Für zwei urbane Einzelbaumstandorte (FsyBOS, FsyWSC) und die beiden frischen bis feuchten Waldstandorte (FsyFRI, FsyPRI) konnte ein abnehmender Einfluss der Wintertemperaturen (Dezember bis Februar) festgestellt werden.

Die moving intervals über 60 Jahre bestätigen die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für die Temperaturabhängigkeit des Radialzuwachses der **Ahornblättrigen Platane**. Die negative Korrelation zu den Juli, September und November Temperaturen im Vorjahr zeigt über die Zeit kaum Veränderungen der Werte. Dafür kann für die Augusttemperaturen im Vorjahr und für die Februartemperaturen eine rückläufige Einflussnahme beobachtet werden, so dass es zwischen den Augusttemperaturen und dem Radialzuwachs in den letzten beiden Jahrzehnten keinen nachweisebaren Zusammenhang mehr gibt. Mit Ausnahme für die abnehmende Korrelation im aktuellen Juni, wurde auch für die Niederschlagabhängigkeit der Zuwachswerte keine oder nur eine geringe Veränderung beobachtet (Tab. 10).

Tabelle 9 Ergebnisse für die Moving Intervals für den Temperatureinfluss im Vorjahr und im aktuellen Jahr. Rote markierte Kürzel stehen für negative Korrelationen und grüne Kürzel für positive Korrelationen. Eine Erläuterung der Abkürzungen findet sich unterhalb der Tabelle.

Art und			**Vorjahr**							**aktuelles Jahr**				
Standort	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
AplBER						0						++		
AplLIL	S++								N--					
AplSAC	0							S0						
ApsSAC	S+++							N--		N--		S+++		
FsyBOR	0	S++	+							S+++	S+	+++		
FsyFRI			S+++	S++				N-				0		
FsyKEL	N--		S+++							S+		0		
FsyPRI			+++	S++			N--	0		S+++		S++		
FsyBOS		S+++						N--						
FsyWSC			S++			N---						S+++		
FsyWIE												S+++	-	
PxhROB	0	N--	0		0			--						
PcoBSH	S+	S++												S+++
PcoFOE		-	0						S+++				S+++	
PcoNUS	0	0							+					0
QrsBOR		S+								S+	S0	0		
QrsWSC	N-						0	N--	N--					
QruBOR	0	0	S+							+++		0		
QruKKP			S+++							S+++				
QruROB	S+++	S++	S+							S+++				
QruSTU	0	S++	S+			N-	N-	N-				0		
QruSTUj		--						N-		S+++		S+		
QruZSC	-	+						N-				-		
TcoBOR	S+++	S+++	S+++							S+++		0		N--
TcoTRO					N-				0		0			
TplKRI			N--	N---		S+++		S+				S++		
TplMEU		-						-				N-		N--
TplPSC	S++	S+	0		S++			N-						
TplTRO		N--				S++		N--				N--		
TxvTRO		N--												

+	Zunahme der Korrelation (<0,10)	-	Abnahme der Korrelation (<0,10)
++	Zunahme der Korrelation <0,20)	--	Abnahme der Korrelation (<0,20)
+++	starke Zunahme der Korrelation (>0,2)	---	starke Abnahme der Korrelation (>0,2)
0	keine Veränderung		
S	Entwicklung zu signifikanten Einfluss	N	Entwicklung zu nicht signifikanten Einfluss
Unterstrichen	sign. Einfluss der für die Gesamtanalyse der Chronologie nicht besteht		

Ein überraschendes Ergebnis wurde für die drei Chronologien der **Kultur-Birne** gefunden. Für die Klima-Zuwachs-Analyse (vgl. Abb. 23) der Birnbäume 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 der Försterlingstraße (PcoFOE) zeigen und einen zunehmenden Einfluss der Sommertemperaturen belegen. Mit Ausnahme für die Chronologie der Bernard-Shaw-Straße, für die eine ansteigende Bedeutung der Temperaturen im Vorjahressommer festgestellt wurde, zeigen sich für die beiden anderen Standorte nur geringe oder keine Veränderungen in der Temperatursensitivität des Wachstums. 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 August und September des Vorjahres und eine besonders starke Zunahme zu den Juni-Niederschlägen im aktuellen Jahr aufweisen, wurde für diese Baumart auf den beiden anderen Standorten eine wesentlich geringere zeitliche Variabilität in der Niederschlag-Zuwachs-Relation festgestellt.

Auch für die **Trauben-Eichen** konnten nur geringe Veränderungen in der Temperaturabhängigkeit des Radialzuwachses ermittelt werden. Einzig der Einfluss der Wintertemperaturen im Januar und Februar für die städtischen Trauben-Eichen (QrsWSC) verringert sich so, dass Effekte von Wintertemperaturen in den letzten Jahrzehnten statistisch nicht mehr nachweisbar sind (Tab. 9). Der Zuwachs der Trauben-Eichen des Waldstandortes (QrsBOR) korreliert zunehmend zu den Niederschlagsmengen von August bis Oktober des Vorjahres. Dagegen verringert sich die Korrelation zu den Niederschlägen im aktuellen Juli für beide Chronologien. Die Trauben-Eichen des urbanen Standortes zeigen nur geringe Veränderungen hinsichtlich der Niederschlagssensitivität.

Bis auf die jungen **Rot-Eichen** auf der Stübelallee (QruSTUj), verstärkt sich für alle Chronologien die Abhängigkeit der Zuwachswerte von den Vorjahrestemperaturen im August und September. Diese Relation entwickelt sich für die Mehrzahl der gefundenen Zusammenhänge erst in den letzten Dekaden zu signifikanten Einflüssen, was darauf verweist, dass die Temperaturen im Vorjahr zu Beginn des Analysezeitraumes für den Zuwachs nur eine untergeordnete Rolle spielten. Bis auf zwei Chronologien (QruSTU, QruZSC) wurde für alle Rot-Eichenchronologien ein sehr starker Anstieg der klimatischen Bindung zu den Apriltemperaturen im aktuellen Jahr gefunden. Dies lässt sich mit Veränderungen der Korrelationskoeffizienten > 0,2 unterlegen. Für drei Standorte wurde zudem ein rückläufiger Einfluss der Wintertemperaturen entdeckt.

Tabelle 10 Ergebnisse für die Moving Intervals für den Niederschlagseinfluss im Vorjahr und im aktuellen Jahr. Rote markierte Kürzel stehen für negative Korrelationen und grüne Kürzel für positive Korrelationen. Eine Erläuterung der Abkürzungen findet sich unterhalb der Tabelle.

Art und	Vorjahr						aktuelles Jahr							
Standort	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug
AplBER			S++							S+		++	-	
AplLIL			S++						N--			+		
AplSAC			S+		0							S+		
ApsSAC				S++							0	-		
FsyBOR	N--	S0	S0						N---	S+++	--	-	0	
FsyFRI								S++				0		
FsyKEL	0	0	S++							N-	N--	++	+	
FsyPRI												+	S++	
FsyBOS		S+++			N---								0	
FsyWSC			-								N--	S+	S+	
FsyWIE								0			+	+	0	
PxhROB			-					0				N--	0	
PcoBSH				-					S+++					N0
PcoFOE		N---	N--	S++		0			0		--	S+++		N--
PcoNUS							0							
QrsBOR	N-	S+	S+	S+				N---		0	0	-	N--	
QrsWSC											S+		N---	
QruBOR	N-	0	0	0						S+++	0	-		N--
QruKKP						0	N---					S+++		
QruROB				S++	0					S++		--		
QruSTU	0	0	0			S0		S0			S0	0		0
QruSTUj			0							S+++		0	S0	
QruZSC						S+					0	0		
TcoBOR	-		S+++	N-					N-	S+	---	--	S0	
TcoTRO	-				N--									
TplKRI			+			S-				N--	N---	+++		
TplMEU	S++			N-				+++				0		
TplPSC			0						N-			S+		
TplTRO			0							S+				
TxvTRO			0			S+								

+	Zunahme der Korrelation (<0,10)	-	Abnahme der Korrelation (<0,10)
++	Zunahme der Korrelation <0,20)	--	Abnahme der Korrelation (<0,20)
+++	starke Zunahme der Korrelation (>0,2)	---	starke Abnahme der Korrelation (>0,2)
0	keine Veränderung		
S	Entwicklung zu signifikanten Einfluss	N	Entwicklung zu nicht signifikanten Einfluss
Unterstrichen	sign. Einfluss der für die Gesamtanalyse der Chronologie nicht besteht		

Bis auf wenige Ausnahmen bleibt der Niederschlagseinfluss im Vorjahr für die Rot-Eichen über die Zeit stabil. Das Wachstum von drei Chronologien (QruBOR, QruROB, QruSTUj) wird in den letzten Jahren zunehmend durch die April-Niederschläge bestimmt, damit zeigen sich Übereinstimmungen zur stärkeren Temperaturbindung im April für diese Baumart. Mit Ausnahme für den Standort des Käthe-Kollwitz-Platzes (QruKKP), wurde für das Vorjahr ein hohes Maß an Stabilität der Zuwachs-Niederschlags-Beziehung beobachtet.

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. Auf dem urbanen Standort (TcoTRO) wurde keine nennenswerte Veränderung in der Klima-Zuwachs-Relation berechnet.

Auch für die vier Standorte der **Sommer-Linde** ergeben sich nur uneindeutige und zum Teil konträre Tendenzen über die Berechnung von moving correlations. So zeigen sich für die Chronologie der Krippener Straße (TplKRI) zunehmende, für die Chronologien der Meußlitzer (TplMEU)sowie der Tronitzer Straße (TplTRO) abnehmende Korrelationen zu den Juni-Temperaturen. Die ansteigende Bedeutung der Dezember-Temperaturen wurde für die Sommer-Linden der Krippener sowie der Tronitzer Straße gefunden. Die Sommer-Linden der Krippener Straße reagieren, sowohl auf den Niederschlag als auch auf die Temperatur, am häufigsten mit einer tendenziösen Veränderung. Dies zeigt sich zum Beispiel für die Zuwachsreaktion bei den Niederschlägen im aktuellen Mai in einer Abnahme der Bedeutung auf ein Korrelationsniveau von aktuell nur noch 0,05 und einer gegensätzlichen Reaktion zu den Juni-Niederschlägen auf ein Korrelationsniveau von 0,40.

Die Wachstumsmuster der **Holländischen Linde** zeigen zu den Temperaturen einzig im August des Vorjahres eine Abhängigkeit, die sich jedoch bis 2008 unter der statistischen Nachweisgrenze verliert. Demgegenüber konnte ein nachweisbar steigender Einfluss der Niederschlagsmengen im Vorjahres-Dezember berechnet werden.

4.3.2 Einzeljahranalysen

Weiserjahranalyse

In Tabelle 11 ist die Anzahl der Weiserjahre, die anhand der Dichtefunktionen der Normalverteilungen ermittelt wurden, dargestellt. Dabei kann grundsätzlich nach den beiden Gruppen für die positiven und negativen Weiserjahre unterschieden werden, in denen wiederum eine differenzierte Unterteilung nach schwachen, starken und extremen Weiserjahren zu finden ist.

Tabelle 11 Artspezifische Anzahl von Weiserjahren für die gemeinsamen Perioden 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.

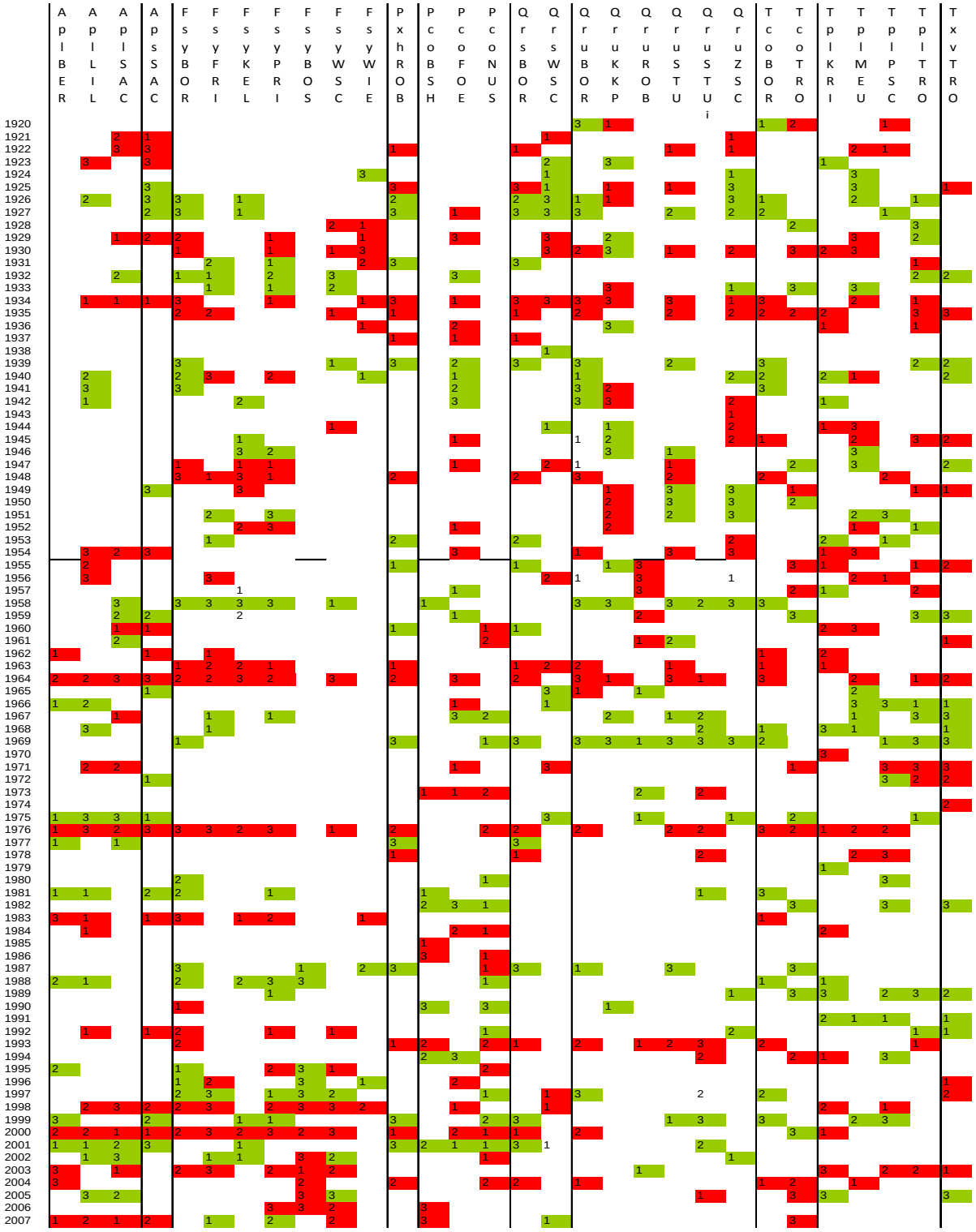
Art und	**Positive Weiserjahre**				**Negative Weiserjahre**				**gesamt**
Standort	schwach	stark	extrem	gesamt	schwach	stark	extrem	gesamt	
AplBER #	5	2	1	8	3	2	3	8	16
AplLIL	5	3	4	12	4	6	4	14	26
AplSAC	1	5	3	9	7	4	3	14	23
ApsSAC	3	4	4	11	7	3	5	15	26
FsyBOR	4	5	6	15	4	8	4	16	31
FsyFRI	7	2	2	11	2	4	6	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
QruSTUj #	1	5	2	8	2	4	1	7	15
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
TplMEU	3	4	6	13	3	7	5	15	28
TplPSC	4	1	7	12	4	3	2	9	21
TplTRO	5	3	5	13	7	3	3	13	26
TxvTRO	5	5	5	15	4	6	2	12	27

Im Vergleich der Arten von Wald- zu Stadtstandorten zeigt sich eine Häufung von Wachstumsanomalien auf der Fläche des Waldstandortes (Borsberg), die mit einer höheren Anzahl von Weiserjahren einhergeht (Tab. 11). Für die Rot-Buchen (FsyBOR) dieses Trockenstandortes sowie für die des Waldstandortes Prießnitz (FsyPRI) wurde mit insgesamt 31 bzw. 30 die höchste Anzahl über- bzw. unterdurchschnittlichen Radialzuwächse im Zeitraum 1920 bis 2007 ermittelt.

Erwartungsgemäß ist die Summe der Weiserjahre bei den sechs Chronologien, die im Zeitraum 1955 bis 2007 untersucht wurden, am geringsten. Eine Ausnahme bilden hier die Kultur-Birnen auf der Nussallee (PcoNUS), die in den nur 52 Jahren bis 2007 eine Anzahl von 22 Weiserjahren aufweisen. Für die Chronologien, die im Zeitraum 1920 bis 2007 betrachtet wurden, konnte für die Einzelbäume der Rot-Buchen auf der Wiener Straße (11 Weiserjahre) sowie die der Waldschlösschenstraße (20 Weiserjahre) und die Rot-Buchen des Waldstandortes Kellerbrücke (FsyKEL) die geringsten Anzahl berechnet werden. Im Vergleich von negativen zu den positiven Weiserjahren zeigen der Spitz- und Berg-Ahorn auf der Sachsenwerkstraße sowie die Kultur-Birnen auf der Försterlingstraße mehrheitlich negative Weiserjahre. Auch dieser Vergleich belegt für die Rot-Buchen-Chronologien abermals eine Sonderstellung. Während der Anteil der positiven Weiserjahre für alle Baumarten und Standorte bei den Waldbäumen der Kellerbrücke (FsyKEL) am höchsten ist, so konnte für die beiden städtischen Einzelbäume (FsyWIE, FsyWSC) die höchste Anzahl negativer Weiserjahre berechnet werden. Die Anzahl der extrem negativen Weiserjahre ($\sigma < -1{,}645$) ist wiederum auf zwei Buchenstandorten (FsyBOS, FsyFRI) und für den Berg-Ahorn auf der Sachsenwerkstraße (ApsSAC), nicht jedoch für den Spitz-Ahorn der Sachsenwerkstraße (AplSAC) am höchsten.

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 12. Im Zeitfenster 1920 bis 2007 werden einige Jahre mit einer besonders hohen Anzahl negativer Weiserjahre sichtbar (vgl. Tab. 12). Unter diesen korrespondieren die geringen Zuwächse der Jahre 1934, 1964, 1976, 2000 sowie im Jahr 2003 eindeutig mit überdurchschnittlichen Temperaturen und unterdurchschnittlichen Niederschlägen von März bis Juli in der laufenden Vegetationsperiode (vgl. Abb. 31). 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.

Tabelle 12 Weiserjahre zwischen 1920 bis 2007 und 1955 bis 2007. Grün = positive Weiserjahre, Rot = negative Weiserjahre, 1 = schwaches, 2 = starkes, 3 = extremes Weiserjahr



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.

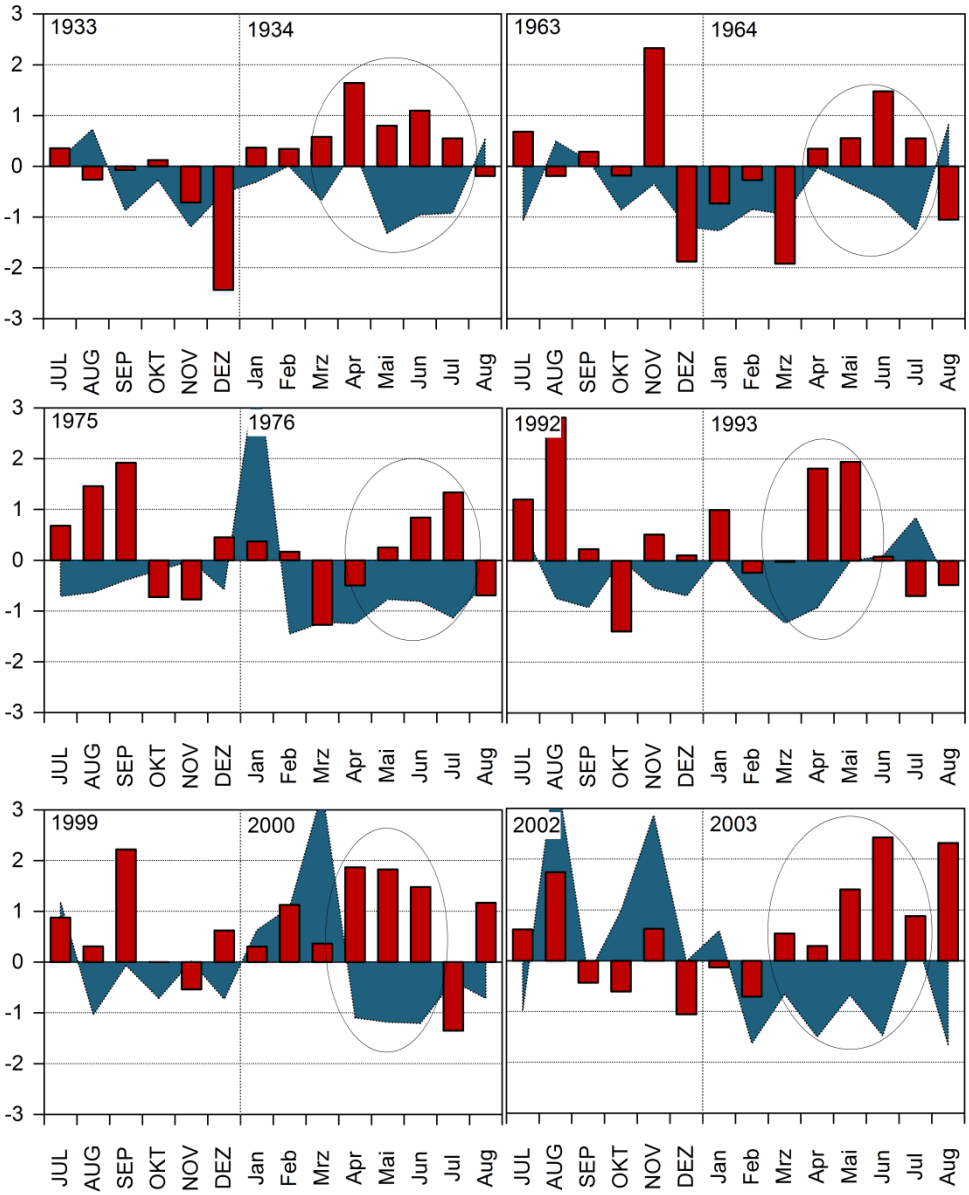


Abbildung 31 Witterungsverlauf in den sechs negativen Weiserjahren, die übereinstimmend am häufigsten bei allen Chronologien gemeinsam vorkommen. Rote Balken = Residuen der Temperatur, Blaue Flächen = Residuen des Niederschlags von Juli des Vorjahres bis August des aktuellen Jahres. Die Kreise markieren Perioden mit einer hohen Anzahl von Monaten überdurchschnittlicher Temperaturen bei gleichzeitigen Niederschlagsdefiziten.

Interessant in diesem Zusammenhang ist, dass nur die Eichenarten, die Ahornblättrige Platane und die Kultur-Birnen im Jahr 1993 mit einem negativen Weiserjahr reagieren (vgl. Tab. 12). Auch die Ahorne und die Rot-Buchen zeigen keine unterdurchschnittlichen Zuwachsrückgänge in diesem Jahr. Eine Ausnahme hiervon kann für die Rot-Buchen des Waldstandortes Borsberg gemacht werden, wie auch alle untersuchten Baumarten dieser Fläche im Jahr 1993 ein negatives Weiserjahr bilden. Die Jahre 1934 (17 Chronologien), 1964 (20 Chronologien) und 1976 (20 Chronologien) zeigen zudem die höchste Anzahl gemeinsam berechneter Weiserjahre aller Chronologien.

Im Jahr 1954 antworten immerhin neun Chronologien mit einem geringen Jahreszuwachs in Form eines negativen Weiserjahres. Hiervon können die Chronologien der Rot-Buchen, der Trauben-Eichen und die der Ahornblättrigen Platane ausgeschlossen werden. Betrachtet man den Witterungsverlauf

des Jahrs 1954, so fallen der kalte Januar und Februar, der sich anschließende etwas überdurchschnittlich warme März und der wiederum kalte und nasse April auf. 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 Tagesmitteltemperatur unter - 1°C nach dem 1. April, so dass Spätfrostereignisse ausgeschlossen werden können. Auch für das Jahr 2000 sowie 2003 zeigen die Spitz- und Berg-Ahorne sowie die Rot-Buchen häufig stark negative Weiserjahre oder sogar extrem negative ($\sigma < 1{,}645$). Obwohl der Witterungsverlauf (Abb. 31) von April bis Juli im Jahr 2000 sowie im Jahr 2003 für das Wachstum eher ungünstige Bedingungen aufwies, zeigt die Mehrheit der Chronologien der Eichenarten und der Winter-Linden keine unterdurchschnittlichen Wachstumsrückgänge. Das gleiche gilt für die Kultur-Birnen und die Ahornblättrige Platane, hier jedoch nur für das Jahr 2003. In den beiden Jahren 1983 sowie 1992 konnten nur für die Rot-Buchen und die Ahorne negative Weiserjahre berechnet werden.

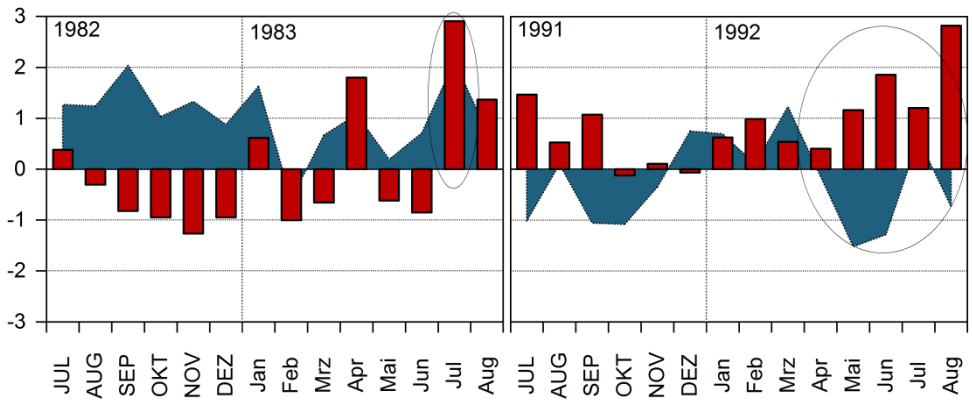


Abbildung 32 Witterungsverlauf in den Weiserjahren 1983 und 1992. Rote Balken = Residuen der Temperatur, Blaue Flächen = Residuen des Niederschlags von Juli des Vorjahres bis August des aktuellen Jahres.

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 (vgl. Abb. 32, links). Der Niederschlag ist in der gesamten Vegetationsperiode eher überdurchschnittlich zu werten. Dagegen konnte der geringe Zuwachs im Jahr 1992 mit den unterdurchschnittlichen Regenmengen von April bis August und den überdurchschnittlichen Temperaturen während des gesamten Jahres bis in den August hinein (Abb. 32, rechts) in Verbindung gebracht werden.

Um mögliche Auswirkungen von Spätfrosteinflüssen 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. Dabei reagieren jedoch nicht alle Baumarten und Chronologien mit einem negativen Weiserjahr (vgl. Tab. 12). Für die Jahre 1976, 1984 herrschten zudem trockene und heiße Witterungsbedingungen in der

Vegetationsperiode. Im Winter des Jahres 1929 wurden Tiefsttemperaturen von -30,5 °C aufgezeichnet, was neben den Spätfrösten eine zusätzliche Erklärung für die unterdurchschnittlichen Radialzuwächse einiger 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°C ermittelt.

Tabelle 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			
QruSTUj	Keine in den letzten 10 Jahren		
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	
TplMEU	Seit 2003 jährliche Bauarbeiten (Gehweg)	2006 teilweise Schnitt	
TplPSC	Keine in den letzten 10 Jahren		
TplTRO	2005 Gehwegsanierung	Ab 2006 jährliche Kroneneinkürzungen und Fällungen	
TxvTRO	2005 Gehwegsanierung	Ab 2006 jährliche Kroneneinkürzungen und Fällungen	

Tabelle 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 Schnittmaßnahmen in den Kronen der Bäume in den Jahren 2006/2007 zurückzuführen. 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 Antwort 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 ist mit Sicherheit auf die Überschüttung am Stammfuß zurückzuführen, 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) ist im Zusammenhang mit dem Pflanzschock und der Etablierung der Bäume nach der Pflanzung zu sehen. 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 lässt sich hier nur spekulieren.

Um einen besseren Vergleich für artspezifische Reaktionsschemata auf außergewöhnliche Abweichungen von der durchschnittlichen Witterung zu gewährleisten, wurden bestimmte Muster der Witterung zu Gruppen zusammengefügt und die Baumarten nach ihrer Bildung von Weiserjahren zugeordnet. Die folgende Übersicht gibt die möglichen Ursachen für die Bildung von negativen Weiserjahren zusammengefasst wieder.

1. Niederschlagsdefizite (mind. ein Monat $\sigma < -1$) und hohe Temperaturen (mind. ein Monat $\sigma > 1$) im gesamten Zeitraum März bis Juli Bsp. 1934, 1948, 2003

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, 2003.

Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn, Rot-Buchen, Sommer-Linde

1.2 Durchschnittliche bis überdurchschnittliche Niederschläge von März bis Juli, aber extrem überdurchschnittlich hohe Temperaturen ($\sigma > +2$) von März bis Juli in einzelnen Monaten Bsp. 1983.

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

Rot-Buche (frische Flächen), Platane , Kultur-Birne

3. Unterdurchschnittlich kalter Mai ($\sigma < 1{,}5$) und überdurchschnittlich hohe Niederschläge von Mai bis August ($\sigma > 1$) Bsp. 1973

Kultur-Birne (schwach bis starkes WJ)

In den sechs Jahren 1926, 1939, 1958, 1969, 1988 und 2001 konnten für mindestens 30 % der Chronologien überdurchschnittliche Zuwächse in Form von **positiven Weiserjahren**, gemäß der hier verwendeten Definition ($\sigma > 1$) berechnet werden (vgl. Tab. 12). Damit sind es gleichzeitig die Jahre mit dem höchsten Anteil positiver Weiserjahre aller Chronologien. Auch für diese Jahre konnten übereinstimmend markante Abweichungen vom durchschnittlichen Witterungsverlauf festgestellt werden. So liegen die Temperaturen im Juni mit Ausnahme für das Jahr 1939 stets unter dem langjährigen Mittel von 1920 bis 2007. 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 10 Chronologien liefert. Ein weiterer wichtiger Faktor bei der Zuwachssteuerung 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.

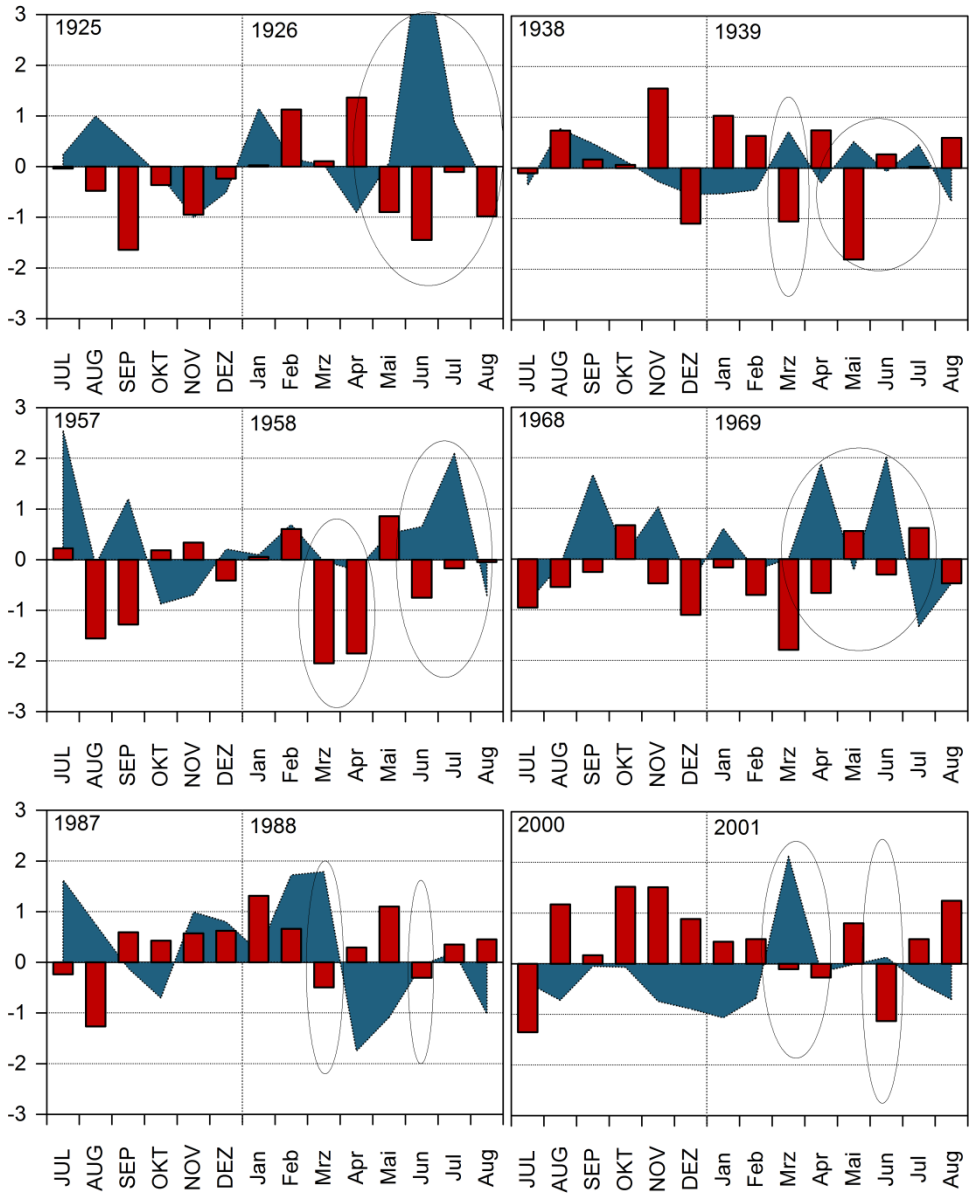


Abbildung 33 Witterungsverlauf in den sechs positiven Weiserjahren, die übereinstimmend am häufigsten bei allen Chronologien gemeinsam vorkommen. Rote Balken = Residuen der Temperatur, Blaue Flächen = Residuen des Niederschlags von Juli des Vorjahres bis August des aktuellen Jahres. Die Kreise markieren Perioden mit einer hohen Anzahl von Monaten unterdurchschnittlicher Temperaturen bei gleichzeitig durchschnittlichen bis hohen Niederschlägen.

Auch die Temperatur- und Niederschlagsbedingungen im März/April dieser Jahre können in Zusammenhang mit den positiven Weiserjahren gesehen werden. Neben dem Verlauf der Witterung im aktuellen Jahr, kann der Einfluss der Vorjahreswitterung auf die Ausbildung der positiven Weiserjahre nicht ausgeschlossen werden. So können die kühlen und feuchten Witterungsbedingungen von Juli bis September der Jahre 1925, 1957, 1968 die Entstehung einer hohen Anzahl positiver Weiserjahre begünstigt haben.

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, für das Jahr 1958 für die Sommer-Linde sowie für die Holländische Linde (Tab. 12). Stellt man die Witterung der Jahre 1958 und 1969 den beiden

Jahren 1988 und 2001 gegenüber (Abb. 33), lässt sich für die Eichen 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, die in den Vorjahren der letztgenannten Jahren nicht erreicht wurden. Auch für die Lindenchronologien und die Rot-Buchen weicht der Zuwachs des langjährigen Mittels im Jahr 2001, bis auf jeweils eine Ausnahme, nicht vom langjährigen Mittel ab.

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, Holländische 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

2. Hohe Niederschläge (mind. drei Monate $\sigma > 1$) und überdurchschnittliche Temperaturen im Herbst und Winter des Vorjahres (mind. drei Monate $\sigma > 1$) sowie durchschnittliche Witterungsverhältnisse in der aktuellen Vegetationsperiode Bsp. 1975

Spitz-Ahorn, Berg-Ahorn

Superposed epoch analysis

In den Abbildungen 34 bis 36 sind die gemittelten Indexwerte der Jahre 1934, 1947, 1964, 1976, 1983, 1993, 2000, 2003, die sich durch ausgeprägte Niederschlagsdefizite mit gleichzeitig einhergehenden hohen Temperaturen in der Vegetationsperiode kennzeichnen lassen, in alphabetischer Reihenfolge nach den Artnamen geordnet dargestellt. Dabei entspricht der Indexwert im Jahr „0“ den gemittelten Indexwerten der acht Trockenjahre, das Jahr 1 den gemittelten Indexwerten im Jahr 1 dem Trockenjahr folgend usw.

Die Straßenbäume der urbanen Standorte markieren standörtliche und artspezifische Unterschiede in der Dynamik der Zuwachsreaktion. Alle drei Chronologien des **Spitz-Ahorns** reagieren mit einem signifikanten Zuwachsrückgang im Trockenjahr, der am stärksten für den am geringsten versiegelten Straßenbaumstandort mit der höchsten mittleren Porosität, der Berchtesgadener Straße (AplBER) ausfällt. 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 Berchtesgadener Straße und die Lilienthalstraße (AplLIL) sogar signifikant über dem durchschnittlichen Radialzuwachs liegt. Der **Berg-Ahorn** auf der Sachsenwerkstraße (ApsBER) zeigt zwar eine ähnliche Zuwachsdynamik wie der Spitz-Ahorn des gleichen Standortes, mit einem geringen Zuwachs in den gemittelten Trockenjahren und einen verstärktem Zuwachs im zweiten Folgejahr, allerdings ergeben sich keine signifikanten Abweichungen vom durchschnittlichen Zuwachs. Der Rückgang der Zuwachsleistung für die **Ahornblättrige Platane** (PxhROB) ist mit ca. 20% relativ moderat, der Einfluss von Trockenheit, der in einem Zuwachsrückgang zum Ausdruck kommt, dennoch statistisch nachweisbar. Im Folgejahr bewegt sich die Zuwachsleistung dieser Baumart noch leicht unterhalb des durchschnittlichen Indexwertes, übersteigt ihn aber im zweiten Folgejahr sichtbar. Für alle hier untersuchten Chronologien zeichnen sich einzig zwei Standorte für die **Kultur-Birne** dadurch aus, auch in Trockenjahren einen durchschnittlichen Zuwachs zu erzielen (PcoBSH, PcoNUS). 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). Damit ähnelt dieses Ergebnis der Entwicklung der gemittelten indexierten Zuwächse für die **Rot-Eichen** des Käthe-Kollwitz-Platzes (QruKKP) und denen der Robert-Berndt-Straße (QruROB), die zwar geringere Radialzuwächse in Trockenjahren erkennen lassen, jedoch keine signifikanten Reduktionen. Im Gegensatz dazu stehen die drei urbanen Rot-Eichenchronologien der Altbäume und Jungbäume der Stübelallee (QruSTU, QruSTUj) sowie die der Zschierener Straße mit ihren signifikanten Zuwachsrückgängen in den Trockenjahren. Dennoch zeigen sich übereinstimmend für alle Eichenchronologien eher mäßige Reduktionen in den Trockenjahren (Indexierter Zuwachs < 20%) und

eine rasche Erholung auf das durchschnittliche Zuwachsniveau schon im Folgejahr. Die **Winter-Linden** der Tronitzer Straße (TcoTRO) zeigen markante Verringerungen in der Zuwachsleistung im ersten und zweiten Folgejahr nach dem Trockenevent, die für keine andere Chronologie beobachtet wurde. Die Zuwachsmuster der **Sommer-Linden** der zwei Standorte der Krippener Straße und der Meußlitzer Straße sind vergleichbar, mit signifikanten Verringerungen der jährlichen Radialzuwächse und einer nachfolgenden Erholung mit einem Höhepunkt im zweiten Folgejahr. Dagegen lassen die Ergebnisse für die beiden Standorte der Peter-Schmoll-Straße (TplPSC) und der Tronitzer Straße (TplTRO) keinen Rückschluss auf eine signifikante Wirkung von Trockenjahren zu. Auch das Zuwachsverhalten der **Holländischen Linde** auf der Tronitzer Straße (TxvTRO) lässt mit durchschnittlichen Zuwächsen in und nach Trockenjahren charakterisieren und entspricht somit weitgehend dem der Sommer-Linde auf dem gleichen Standort.

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. Auch in den nachfolgenden Zuwachsgängen lassen sich Unterschiede zwischen den beiden Gruppen erkennen. So erreichen die Rot-Buchen, und im besonderen Maße die Winter-Linden das durchschnittliche Zuwachsniveau erst im zweiten Folgejahr. Damit wird auf diese beiden Baumarten 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 geringere indexierte Radialzuwächse bis 20% berechnet werden. Hier sind jedoch keine Effekte auf den nachfolgenden Zuwachs ins Folgejahr zu beobachten.

Nur zwei der urbanen Einzelbäume der Rot-Buche (FsyWSC, FsyWIE) zeigen einen statistisch nachweisbaren Rückgang des Radialzuwachses in Jahren mit Niederschlagsdefiziten, der am stärksten für den ältesten Einzelbaum auf der Waldschlösschenstraße ausfällt. Diese Chronologie zeigt zudem Ähnlichkeiten zu den beiden Standorten für den Spitz-Ahorn auf der Berchtesgadener und Lilienthalstraße (AplBER, AplLIL) mit einem deutlich und signifikant überdurchschnittlichen Zuwachsanstieg im zweiten Folgejahr.

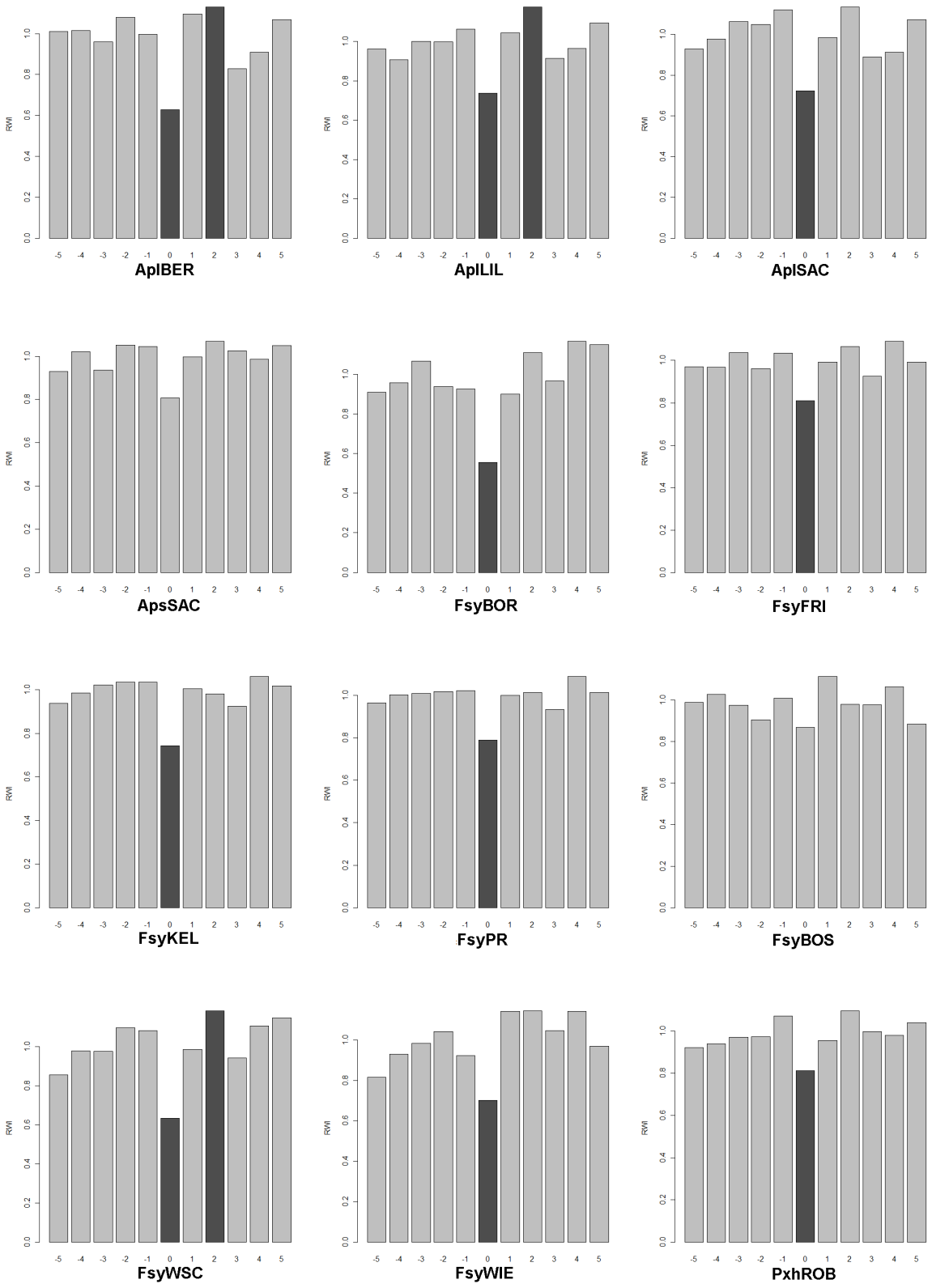


Abbildung 34 Abweichung Indexwertes für die Durchschnittswerte der acht Trockenjahre von *Acer* bis *Platanus*, die für die superposed epoch analysis (SEA) verwendet wurden. Schwarz markierte Jahre unterscheiden sich in ihrem Zuwachs signifikant (P < 0,05). Das Jahr 0 entspricht dem Mittelwert des Zuwachsindex der Trockenjahre, -5 fünf Jahre vorher, +5 fünf Jahre danach usw.

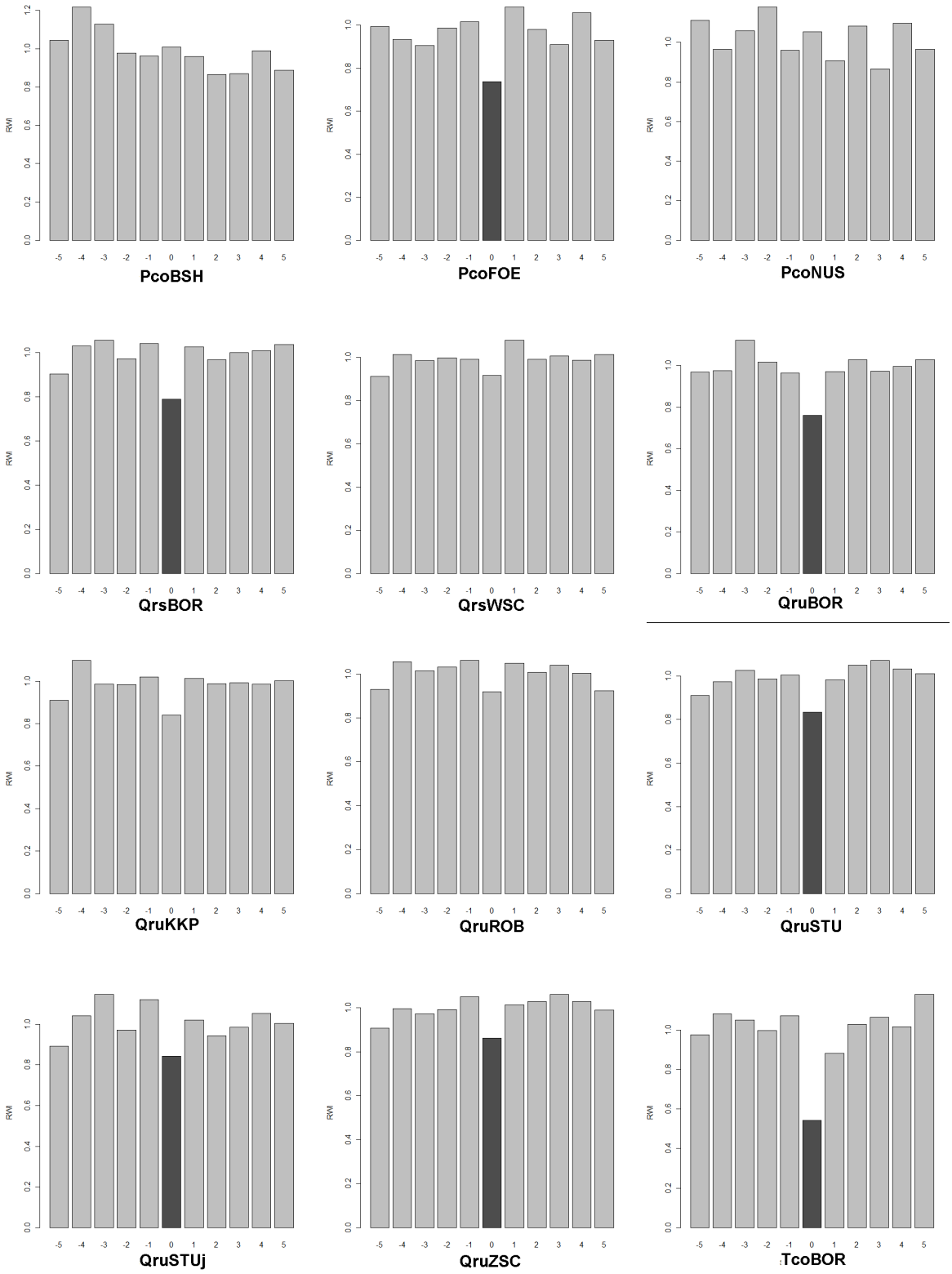


Abbildung 35 Abweichung Indexwertes für die Durchschnittswerte der acht Trockenjahre von *Pyrus* bis *Tilia cordata*, die für die superposed epoch analysis (SEA) verwendet wurden. Schwarz markierte Jahre unterscheiden sich in ihrem Zuwachs signifikant (P < 0,05). Das Jahr 0 entspricht dem Mittelwert des Zuwachsindex der Trockenjahre, -5 fünf Jahre vorher, +5 fünf Jahre danach usw.

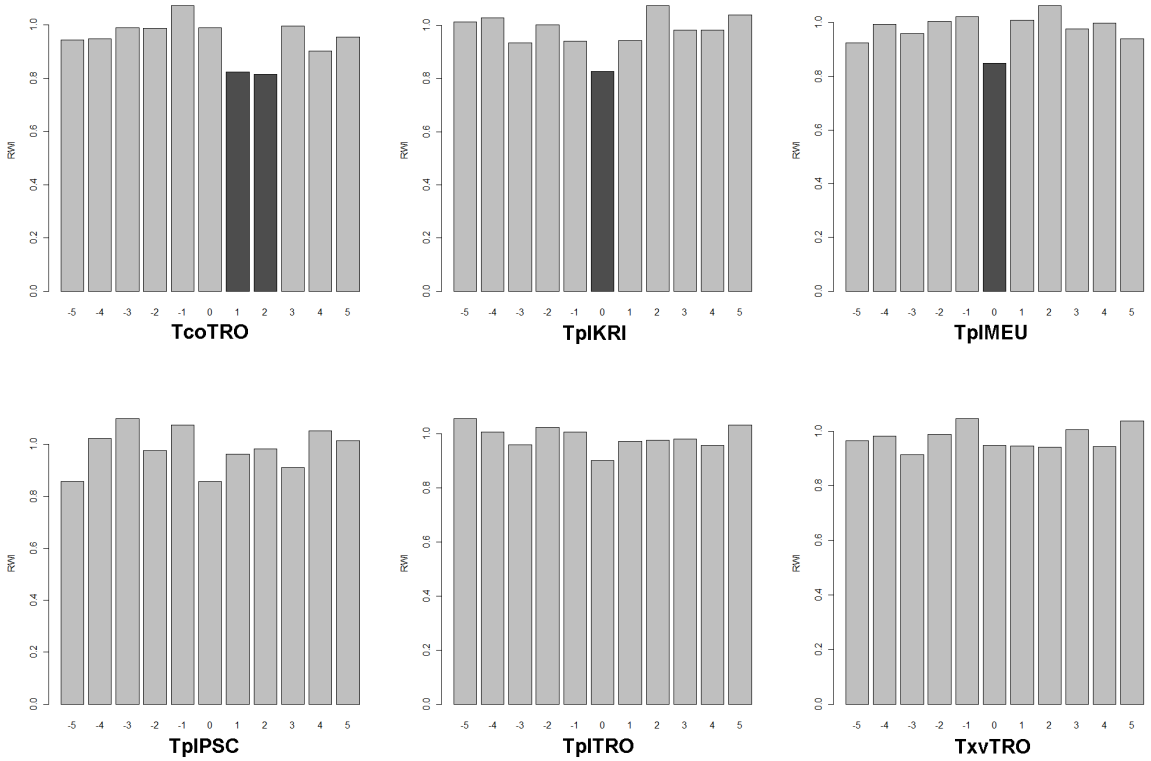


Abbildung 36 Abweichung Indexwertes für die Durchschnittswerte der acht Trockenjahre von *Tilia cordata* bis *Tilia* x *vulgaris*, die für die superposed epoch analysis (SEA) verwendet wurden. Schwarz markierte Jahre unterscheiden sich in ihrem Zuwachs signifikant (P < 0,05). Das Jahr 0 entspricht dem Mittelwert des Zuwachsindex der Trockenjahre, -5 fünf Jahre vorher, +5 fünf Jahre danach usw.

4.4 Bodenwasserhaushalt

Die Abbildungen 37 und 38 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 in den letzten 7 bis 10 Tagen des Juni und im Zeitraum vom 10. bis 20. Juli beobachtet werden.

Zwischen den auch räumlich nahe beieinander liegenden Straßenbaumstandorten Lilienthalstraße (Abb. 37), Robert-Berndt-Straße und Sachsenwerkstraße (Abb. 38) 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. 39), 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. 37). 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 (Abb. 39). 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. 37).

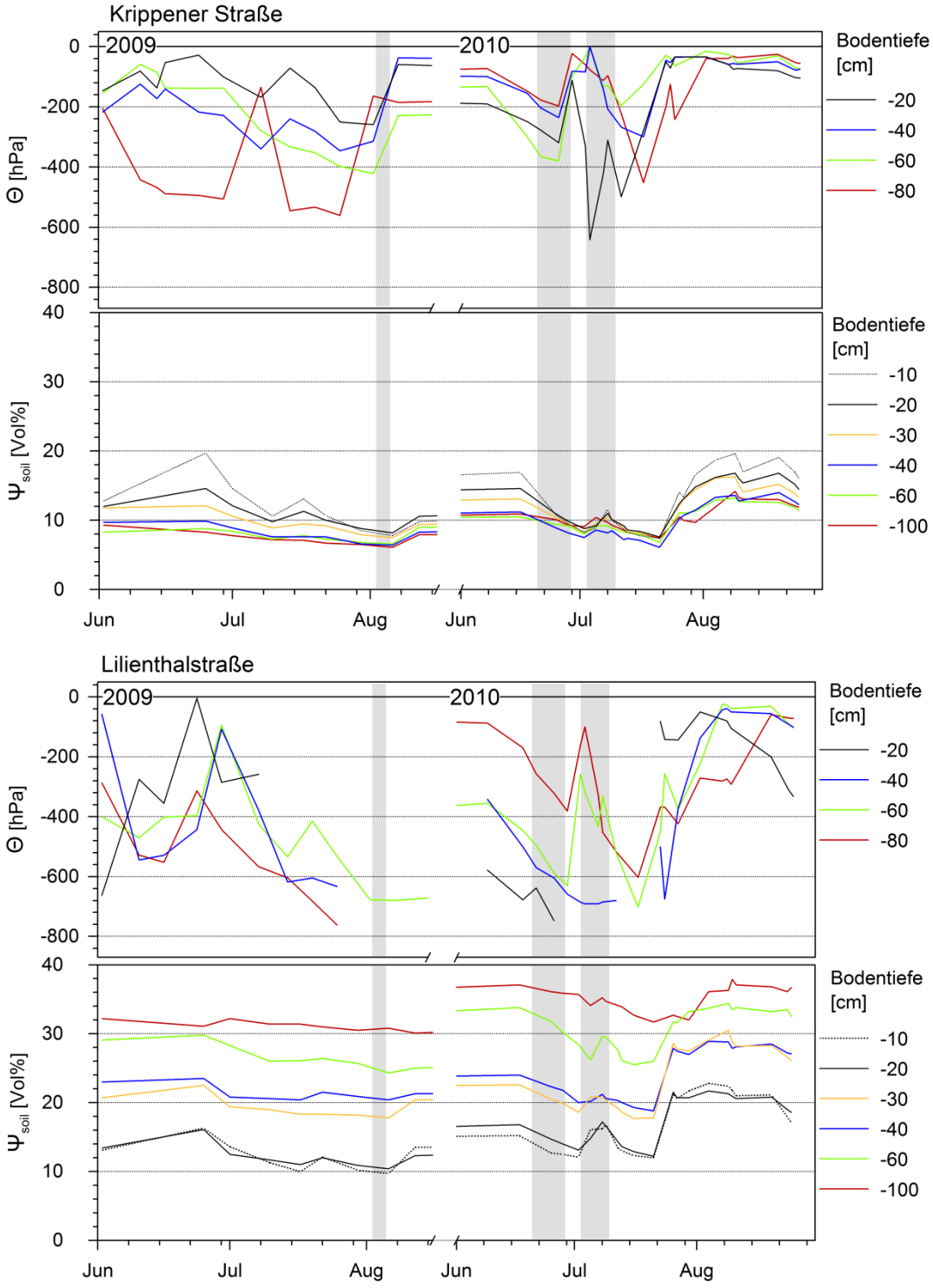


Abbildung 37 Saisonaler Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Θ) und des volumetrischen Bodenwassergehaltes (Ψ_{soil}) für die Straßenbaumstandorte Krippener Straße und Lilienthalstraße im Zeitraum vom 01.06. bis zum 16.08.2009 (n = 12 Messtermine) sowie vom 01.06. bis zum 31.08.2010 (n = 22 Messtermine). Der Verlauf wurde aus den einzelnen Tagesmesswerten ermittelt. Graue Balken markieren mehrtägige Trockenperioden mit aufeinander folgenden Werten eines VPD von über 10 hPa (Daten der Station Dresden-Klotzsche).

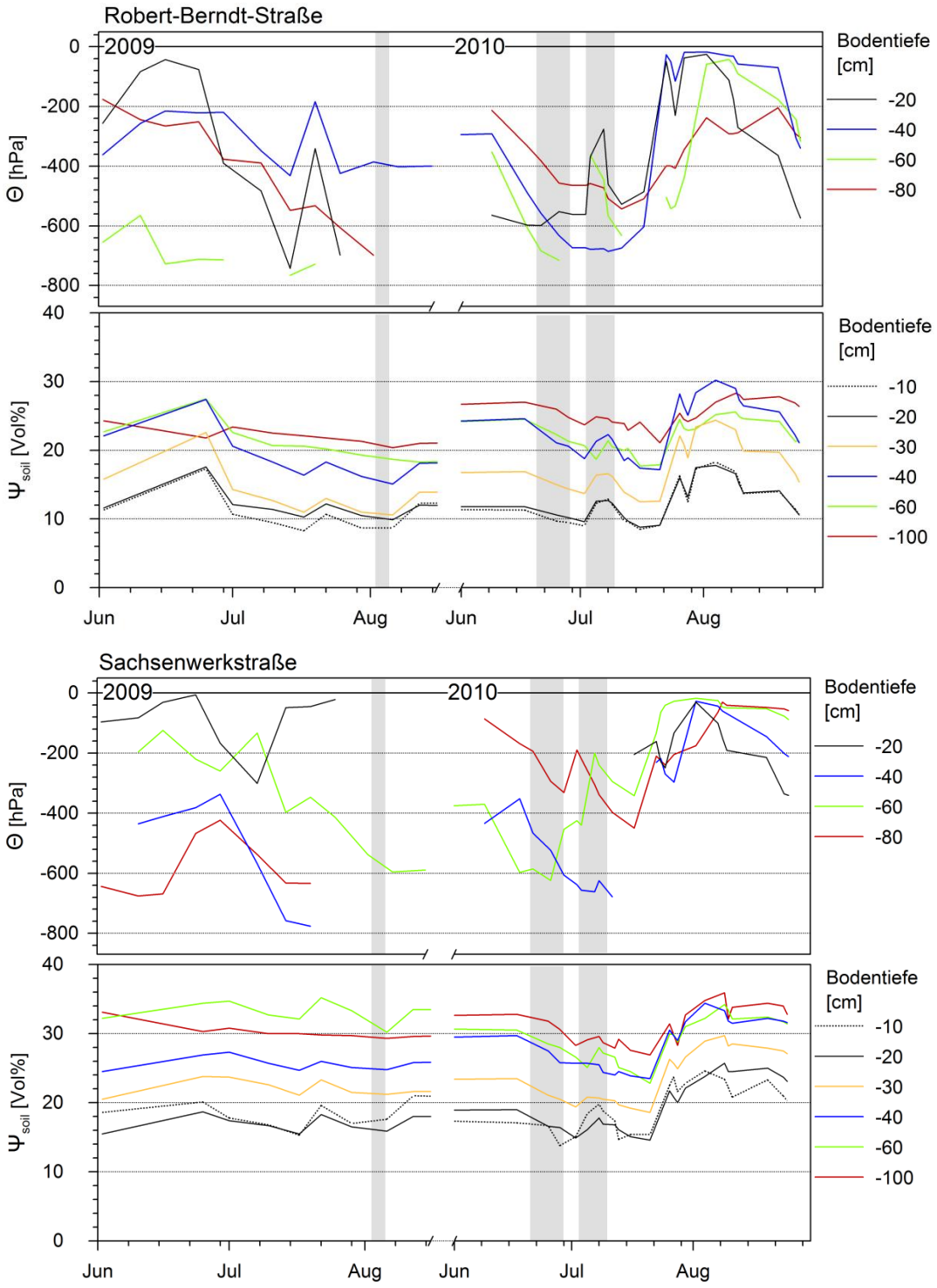


Abbildung 38 Saisonaler Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Θ) und des volumetrischen Bodenwassergehaltes (Ψ_{soil}) für die Straßenbaumstandorte Robert-Berndt-Straße und Sachsenwerkstraße im Zeitraum vom 01.06. bis zum 16.08.2009 (n = 12 Messtermine) sowie vom 01.06. bis zum 31.08.2010 (n = 22 Messtermine). Der Verlauf wurde aus den einzelnen Tagesmesswerten ermittelt. Graue Balken markieren mehrtägige 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 drei weiteren Standorten finden sich nur bis zu einer Bodentiefe von 30 cm (Abb. 39). Ab einer Bodentiefe

von 40 cm unterscheidet sich der Bodenwassergehalt für die Krippener deutlich und signifikant von den gleichen Tiefen der restlichen Standorte.

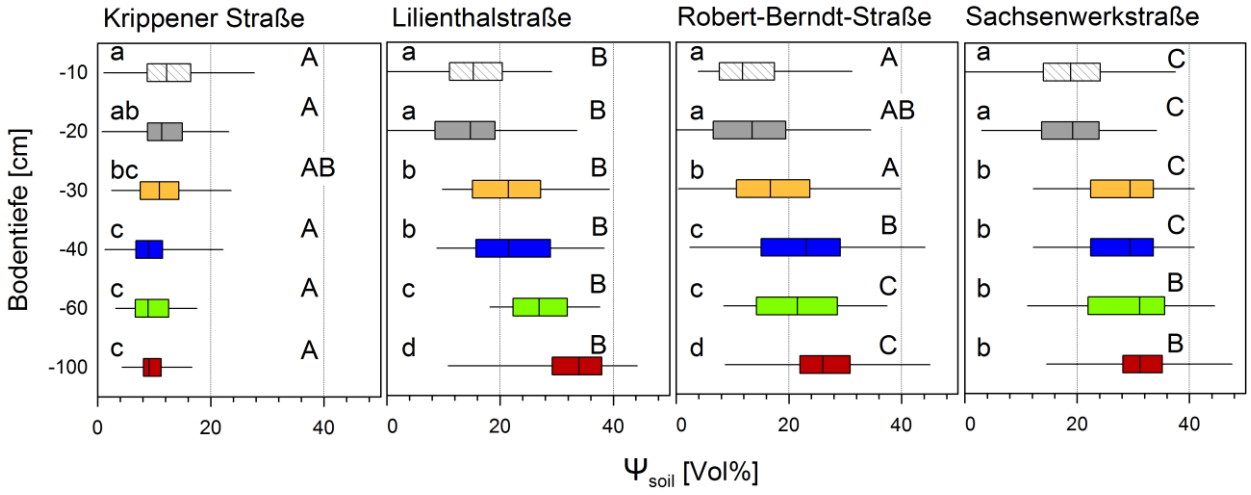


Abbildung 39 Volumetrischer Bodenwassergehalt in den beiden Messperioden nach Bodentiefen und Standorten. Unterschiedliche Buchstaben verweisen auf signifikante Unterschiede. Kleinbuchstaben stehen für einen vertikalen Vergleich, also einen Vergleich des Bodenwassergehaltes nach Bodentiefe für die betreffende Straße, und Großbuchstaben für einen Vergleich zwischen den vier Straßenbaumstandorten.

4.5 Blatt-Wasserpotential

Die Tagesminima der Blatt-Wasserpotentiale (Ψ_{min}) für die 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 beobachtet werden.

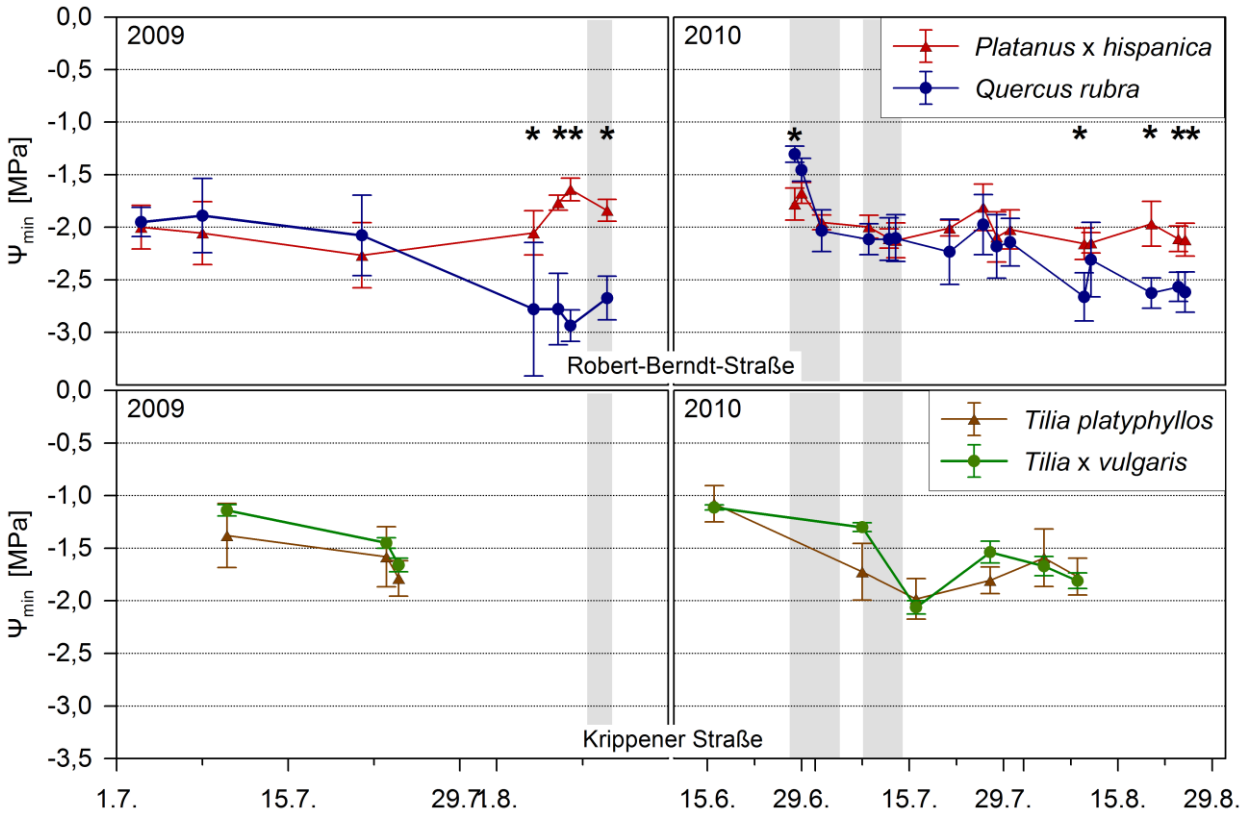


Abbildung 40 Tagesminima der Blatt-Wasserpotentiale Ψ_{min} mit Angaben des Median und der Standardabweichung in den Untersuchungsperioden 2009 und 2010. Signifikante Unterschiede zwischen den Baumarten eines Standortes sind mit einem Sternchen (*) gekennzeichnet. Graue, vertikale Balken markieren mehrtägige 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 der Blatt-Wasserpotentiale berechnet werden.

4.6 Gaswechselanalytik

4.6.1 Transpiration

In Abbildung 41 sind die Transpirationsraten mittels Box-Whisker-Plots angegeben. Im Jahr 2009 erreicht die Transpiration der Ahornblättrigen Platane mit einem Median von 0,9 mmol/m²s signifikant höhere Werte als die Ahorn- und Lindenarten mit Medianen der Transpiration unter 0,5 mmol/m²s. Dagegen zeigen die Ergebnisse für das Jahr 2010 keine statistisch nachweisbaren Unterschiede zwischen diesen vier Baumarten mit Transpirationsleistungen von 0,5 (*A. platanoides*) bis 1,25 mmolm² s (*Q. rubra*). Grundsätzlich kann eine hohe Übereinstimmung für die Werte der Transpiration von *A. platanoides* und *T.* x *vulgaris* gefunden werden, die in den beiden betrachteten Jahren auch jeweils die niedrigsten mittleren Transpirationsraten aufwiesen. Auf der anderen Seite

können für die Ahornblättrigen Platane mit den maximalen Transpirationsraten von teilweise 2,3 mmol/m²s in beiden Jahren und für die Rot-Eiche mit den jeweils zweithöchsten Werten die höchsten Transpirationswerte beobachtet werden. Im Jahr 2010 zeigen alle Baumarten höhere Werte als im Vorjahr, was sich auch in den Maxima wiederfindet.

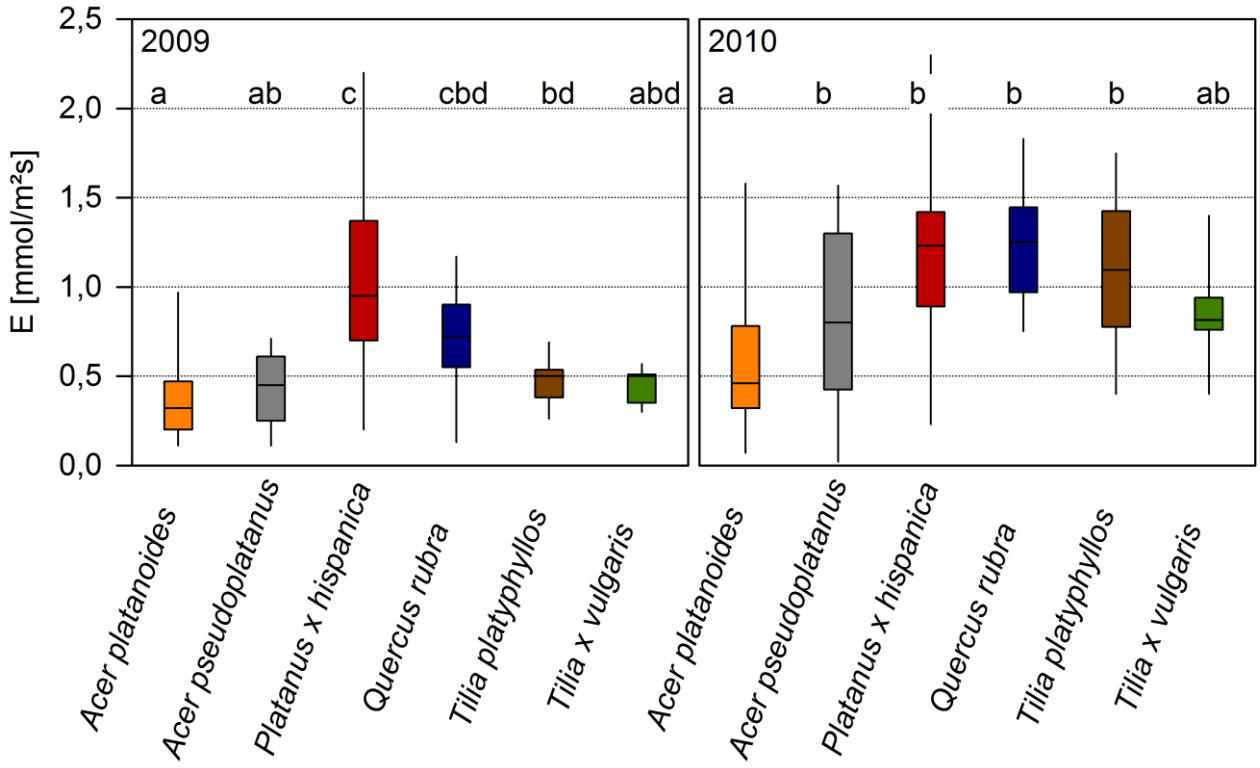


Abbildung 41 Transpirationsraten (E) in den Jahren 2009 und 2010. Signifikante Unterschiede (p < 0,05) zwischen den Arten sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Zeitgleiche Messungen an unterschiedlichen Arten bieten die Möglichkeit, die Transpirationsraten direkt gegenüberzustellen und tagesweise zu vergleichen. In Abbildung 42 sind die Transpirationsraten deshalb im saisonalen Verlauf mit den korrespondierenden Parallelen gegenübergestellt. Grundsätzlich bestätigen sich dabei die Ergebnisse für die jahresweise ermittelten Werte. So können im Vergleich für *P.* x *hispanica* und *Q. rubra* auf der Robert-Berndt-Straße zumeist höhere Transpirationsleistungen beobachtet werden. Im direkten Tagesvergleich zeigen sich im Jahr 2009 signifikante Übereinstimmungen der Transpirationsleistung von *A. platanoides* (Lilienthalstraße) zu *A. pseudoplatanus* (Sachsenwerkstraße), von T. *platyphyllos* zu *T.* x *vulgaris* (beide auf der Krippener Straße) und von *P.* x *hispanica* zu *Q. rubra* (beide Robert-Berndt-Straße). Dennoch wurden im Vergleich von *Q. rubra* mit *P.* x *hispanica* für den 04.08.2009 auch signifikant höhere Transpirationsleistungen von *P.* x *hispanica* ermittelt. In den beiden Trockenperioden vom 27.06 bis zum 04.07.2010 und vom 08.07 bis 14.07.2010 hat der Berg-Ahorn höhere Transpirationsraten als der Spitz-Ahorn.

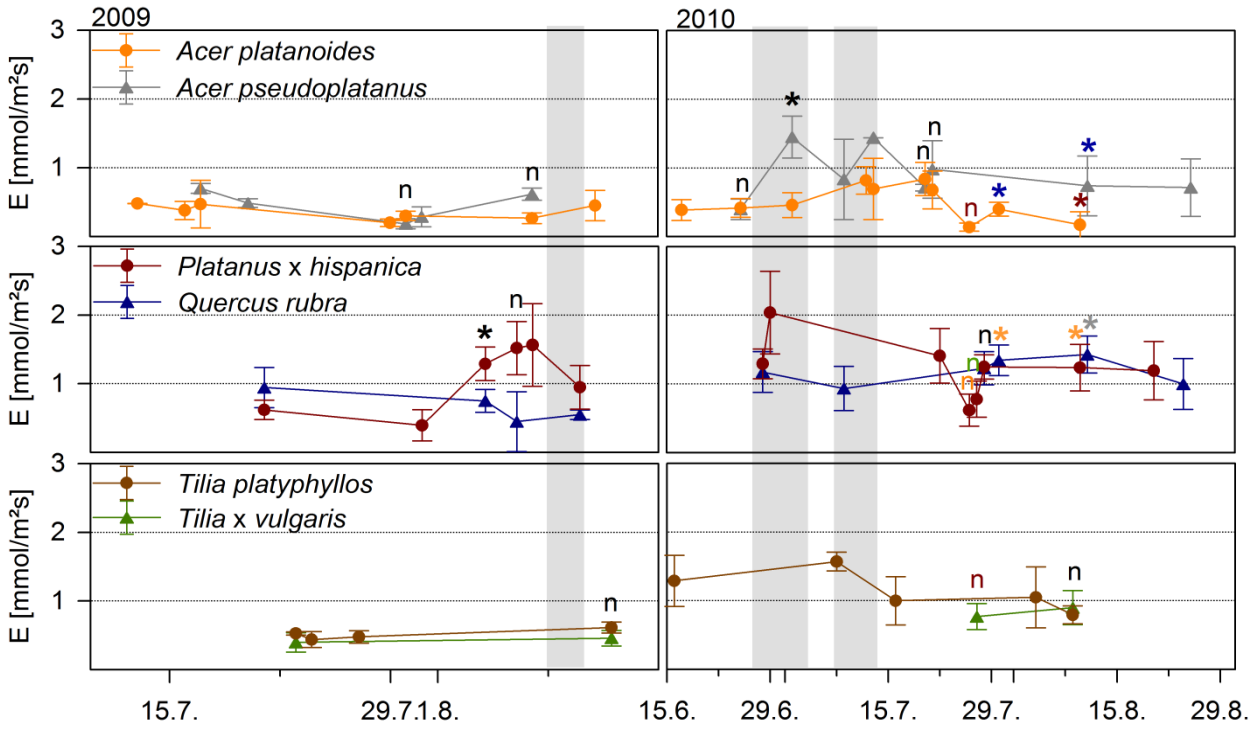


Abbildung 42 Transpirationsraten (E) der Tagesmessungen im saisonalen Vergleich der Jahre 2009 und 2010. Sternchen (*) markieren Parallelmessungen an zwei Arten, die sich in ihren Transpirationsraten signifikant unterscheiden und mit (n) gekennzeichnete Messungen als statistisch gleich zu wertende Transpirationsleistungen. 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.

4.6.2 Photosynthese und WUE

Im Folgenden werden die lichtgesättigten Netto-Photosyntheseraten und die WUE zunächst wieder jahresweise zusammengestellt (Abb. 43) und anschließend unter Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik verglichen (Abb. 44).

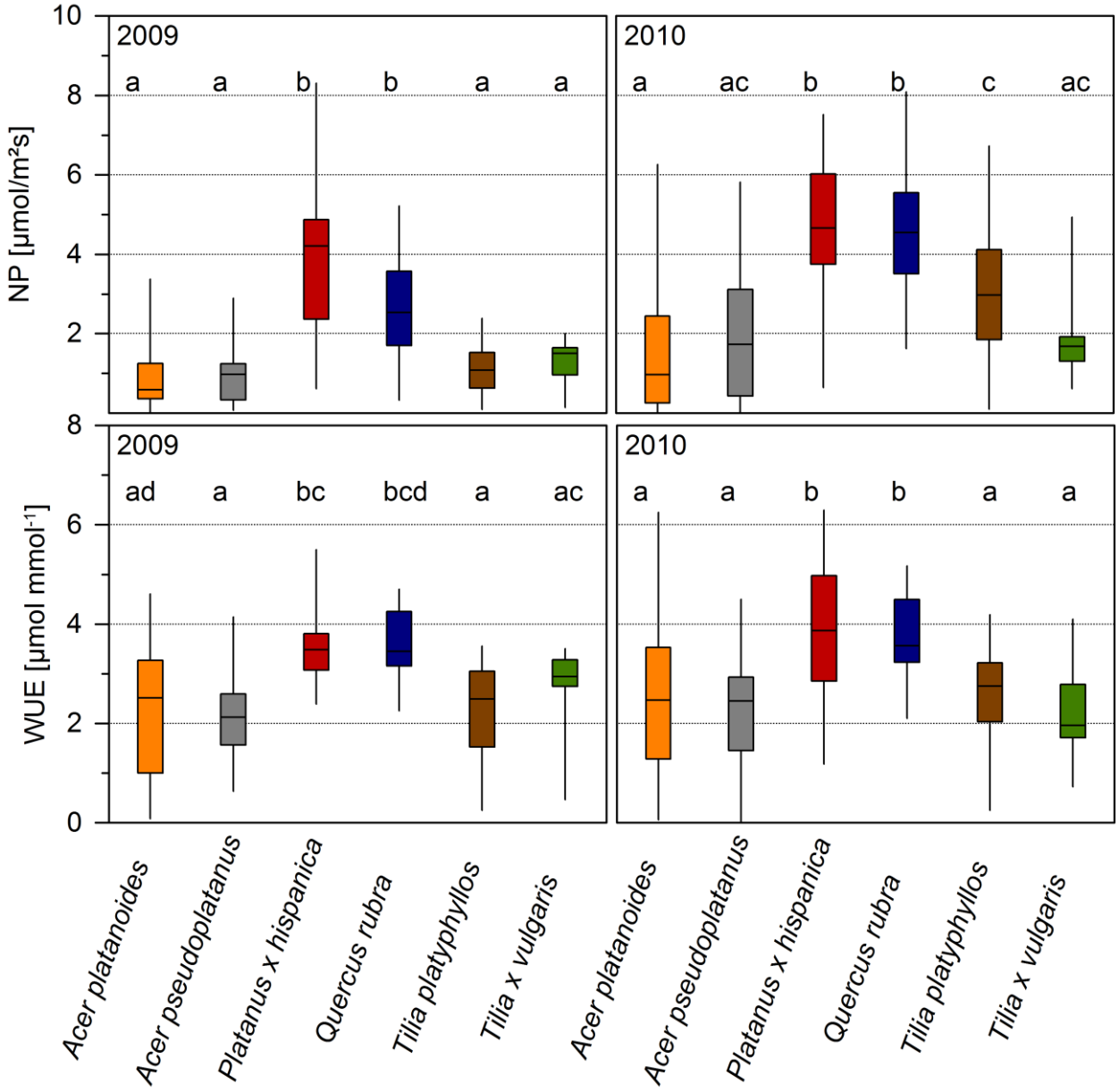


Abbildung 43 Netto-Photosynthese (NP) und Wassernutzungseffizienz (WUE) in den Jahren 2009 und 2010. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen den Arten sind mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichnet.

Die höchsten Werte der Netto-Photosynthese unter Lichtsättigung mit über 8 µmol/m² s können bei *P.* x *hispanica* und *Q. rubra* beobachtet werden (Abb. 43). 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 µmol/mmol und der Ahornblättrigen Platane mit einem Median von 3,86 µmol/mmol deutlich höher und weicht

signifikant von den anderen Arten ab. Im Jahr 2010 zeigt die Holländische Linde mit einer WUE von lediglich 1,96 µmol/mmol den niedrigsten Median. Der Maximalwerte wurde am 26.07.2010 mit 6,30 µmol/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 als bei 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 44 ist die Netto-Photosyntheseleistung über die beiden Messperioden im saisonalen Verlauf dargestellt. Dabei bestätigen sich die höheren Leistungen der Netto-Photosynthese für *Q. rubra* und *P.* x *hispanica* zu den restlichen vier Arten auch im jeweiligen Jahresverlauf.

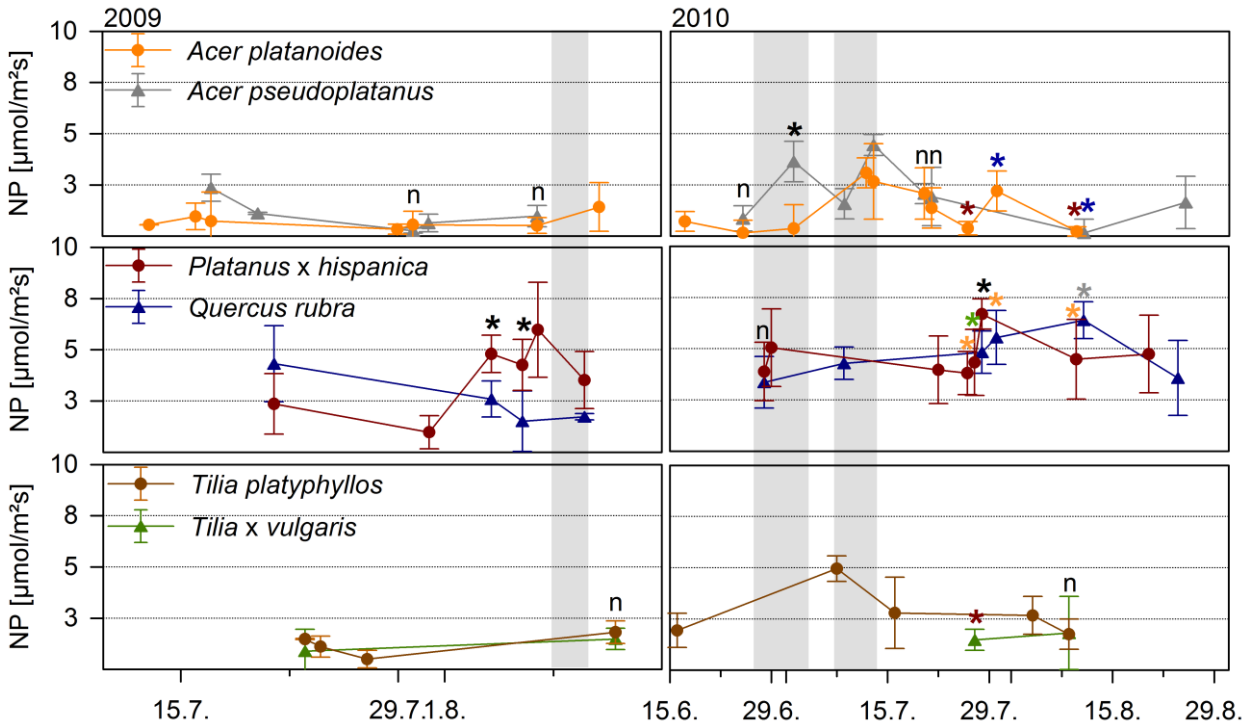


Abbildung 44 Netto-Photosyntheseraten (NP) der Tagesmessungen im saisonalen Vergleich der Jahre 2009 und 2010. Sternchen (*) markieren Parallelmessungen an zwei Arten, die sich in ihrer Netto-Photosynthese signifikant unterscheiden. Mit (n) gekennzeichnete Messungen markieren als statistisch gleich zu 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 Trockenperioden sind durch grau hinterlegte, vertikale Felder angezeigt.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen für den tagesweisen Vergleich der Transpiration (vgl. Abb. 42), 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 Unterschiede im Reaktionsverhalten von Spitz- zu Berg-Ahorn zeigen sich auch für die Netto-Photosyntheseleistung. 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 die Parallelmessungen damit eine hohe Übereinstimmung in der Transpirations- sowie Netto-Photosyntheseleistung von *A. platanoides* mit *A. pseudoplatanus* und von T. *platyphyllos* mit *T.* x *vulgaris.*

Auch für die Darstellung der WUE im Jahresverlauf lässt sich eine hohe Übereinstimmung in der Effizienz der Wassernutzung in der Gruppe für die Ahornblättrige Platane und die Rot-Eiche, in der Gruppe des Spitz- und Berg-Ahorns sowie in der Gruppe für die Sommer-Linde und die Holländischen Linde finden (Abb. 45).

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 in den meisten Fällen statistisch nachweisbare Unterschiede in der WUE, mit grundsätzlich höheren Werten für die die Ahornblättrige Platane und die Rot-Eiche.

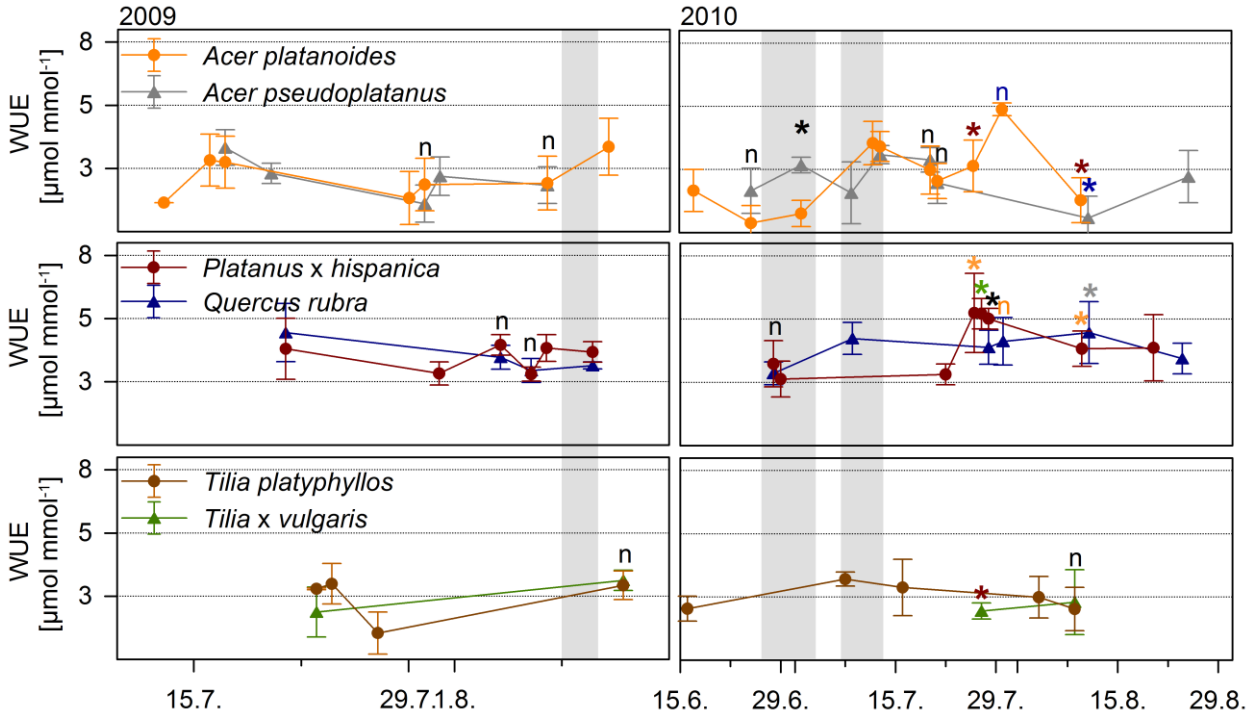


Abbildung 45 Effizienz der Wassernutzung (WUE) der Tagesmessungen im saisonalen Vergleich der Jahre 2009 und 2010. Sternchen (*) markieren Parallelmessungen an zwei Arten, die sich in ihrer WUE signifikant unterscheiden und mit (n) gekennzeichnete Messungen als statistisch gleich zu wertende Werte der 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 Abhängigkeiten des Gaswechsels vom Bodenwasserhaushalt und dem ALVPD

In Tabelle 14 sind die Korrelationskoeffizienten nach Spearman für die Abhängigkeit der Gaswechselmessungen vom volumetrischen Bodenwassergehalt (Θ), vom Bodenmatrixpotential (Ψ_{soil}) und vom ALVPD aufgetragen. Dabei wird deutlich, dass die Parameter des Gaswechsels am häufigsten signifikant zum ALVPD korrelieren. Einzig für die Transpirationsleistung der Ahornblättrigen Platane sowie für die Effizienz der Wassernutzung der Holländischen Linden konnten nur sehr geringe Korrelationskoeffizienten von nur -0,10 bzw. -0,20 berechnet werden. Alle berechneten Korrelationen der Parameter des Gaswechsels zum ALVPD sind negativ und damit können hohe ALVPD-Werte mit geringen Transpirations- und Netto-Photosyntheseleistungen sowie einer geringen Effizienz der Wassernutzung assoziiert werden.

Es zeigen sich allerdings auch signifikante Zusammenhänge zu den Zeitreihen des volumetrischen Bodenwassergehaltes und des Bodenmatrixpotentials mit teilweise widersprüchlichen Ergebnissen für die Baumarten. So gehen für die Rot-Eiche hohe Leistungen der Netto-Photosynthese mit hohen Werten des volumetrischen Bodenwassergehaltes einher, während für den Berg- und Spitz-Ahorn inverse Beziehungen berechnet wurden (Tab. 14). Mit Korrelationskoeffizienten bis 0,85 ist die Transpiration der Holländischen Linde stark vom Wassergehalt des Bodens in einer Tiefe bis 100 cm abhängig.

Für die korrekte Prüfung und Beurteilung der abhängigen Variablen des Gaswechsels von den unabhängigen Variablen des Bodenwasserhaushaltes und dem ALVPD wurden deshalb graphische Darstellungen und die Berechnung linearer Regressionen durchgeführt (Abb. 46 bis 49). Die Streudiagramme in Abbildung 46 mit der Darstellung der Transpiration und des volumetrischen Bodenwassergehaltes für die zuvor signifikant berechneten Korrelationskoeffizienten machen deutlich, dass für die beiden Ahornarten und die Ahornblättrige Platane keine gerichtete Abhängigkeit erkennbar ist. Zudem ist der Anteil erklärbarer Varianz für die Regressionsmodelle mit $R^2 \leq 0{,}07$ sehr gering. Dagegen bekräftigen die Ergebnisse für die Rot-Eiche und die Holländische Linde die Abhängigkeit der Transpirationsleistung vom Bodenwassergehalt in den angegebenen Bodentiefen, so dass für diese beiden Baumarten ein hoher Bodenwassergehalt eine hohe Transpiration ermöglicht. Da die Werte des volumetrischen Bodenwassergehaltes für die verschiedenen Bodentiefen für die Holländische Linde auf der Krippener Straße sehr eng beieinander liegen, (vgl. Abb. 37) unterscheiden sich auch die Punktwolken in Abbildung 46 für die Abhängigkeit der Transpiration vom Bodenwassergehalt nur unwesentlich. Aus diesem Grund wurde auf die Darstellung der Diagramme für die Bodentiefe 30 cm und 60 cm verzichtet.

Tabelle 14 Spearmansche Korrelationskoeffizienten zwischen den Parametern der Gaswechselmessungen und dem ALVPD, des volumetrischen Bodenwassergehaltes und dem Bodenmatrixpotential in verschiedenen Bodentiefen. Fett gedruckte Wert sind signifikant (P < 0.05).

	volumetrischer Bodenwassergehalt (Θ) [Vol.%]						**Bodenmatrixpotential (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											
A. platanoides	0,00	0,12	-0,07	**-0,54**	0,01	0,11	-0,23	**-0,48**	-0,15	0,06	**-0,64**
A. pseudoplatanus	**-0,32**	-0,23	**-0,36**	-0,07	**-0,44**	-0,28	**-0,36**	-0,12	-0,12	-0,18	**-0,30**
P. x *hispanica*	-0,13	**-0,29**	-0,10	-0,09	-0,10	0,04	-0,10	-0,17	0,27	0,10	-0,10
Q. rubra	**0,39**	**0,42**	**0,47**	**0,47**	**0,52**	**0,50**	0,11	0,27	0,22	**0,50**	**-0,61**
T. platyphyllos	0,07	0,07	0,24	0,17	0,26	0,25	0,20	**-0,38**	**0,32**	**0,41**	**-0,38**
T. x *vulgaris*	**0,80**	**0,84**	**0,84**	**0,84**	**0,84**	**0,84**	0,39	-0,03	-0,08	-0,18	**-0,79**
Netto-Photosynthese											
A. platanoides	0,04	0,12	0,00	**-0,37**	0,07	0,04	0,02	**-0,53**	0,04	0,07	**-0,69**
A. pseudoplatanus	**-0,50**	**-0,39**	**-0,44**	-0,15	**0,45**	**-0,38**	**-0,40**	**-0,36**	-0,26	**-0,38**	**-0,55**
P. x *hispanica*	0,20	0,11	0,22	0,22	0,20	0,16	0,07	0,16	0,03	0,21	**-0,53**
Q. rubra	**0,54**	**0,58**	**0,59**	**0,60**	**0,48**	**0,22**	**0,51**	**0,54**	**0,40**	**0,54**	**-0,73**
T. platyphyllos	-0,04	-0,04	0,13	0,07	0,15	0,19	0,08	**-0,48**	0,23	**0,37**	**-0,41**
T. x *vulgaris*	0,28	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	-0,12	0,20	0,28	0,28	**-0,56**
WUE											
A. platanoides	0,04	0,08	0,08	-0,09	-0,10	-0,15	0,23	**-0,37**	0,05	-0,14	**-0,54**
A. pseudoplatanus	**-0,30**	-0,20	-0,19	-0,06	-0,16	-0,13	-0,11	-0,28	-0,09	-0,26	**-0,59**
P. x *hispanica*	**0,53**	**0,59**	**0,49**	**0,50**	**0,44**	0,20	0,30	**0,51**	-0,25	0,22	**-0,66**
Q. rubra	**0,38**	**0,42**	**0,41**	**0,41**	0,19	-0,05	**0,44**	**0,37**	**0,33**	0,07	**-0,61**
T. platyphyllos	-0,12	-0,12	0,04	0,03	0,04	0,04	0,35	**0,34**	0,08	0,21	**-0,30**
T. x *vulgaris*	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,22	0,41	0,11	0,39	-0,20

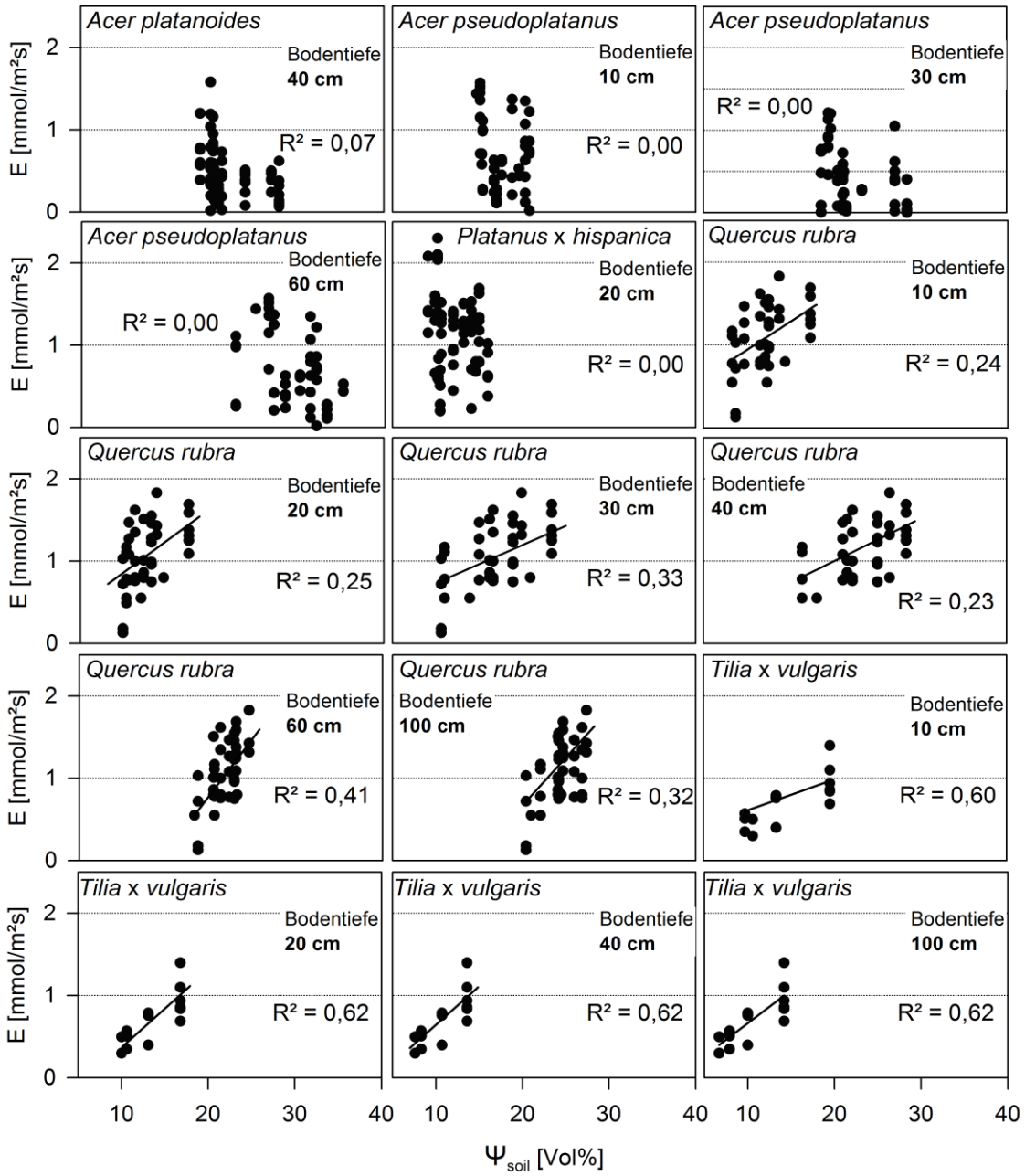


Abbildung 46 Abhängigkeit der Transpiration (E) vom volumetrischen Bodenwassergehalt für die zuvor ermittelten signifikanten Korrelationen der Bodentiefen (vgl. Tab. 14). Für Relationen mit $R^2 > 0,2$ wurden die Regressionsgeraden eingezeichnet.

Im Folgenden sind die statistisch nachweisbaren Zusammenhänge der Netto-Photosynthese, bzw. der WUE vom volumetrischen Bodenwassergehalt abgebildet (Abb. 47). Nur für die Rot-Eiche konnten belegbare Abhängigkeiten der Netto-Photosyntheseleistung vom Bodenwassergehalt ermittelt werden. Für jede Bodentiefe von 10 bis 100 cm finden sich hier signifikante Zusammenhänge mit Bestimmtheitsmaßen der linearen Regressionen von 0,21 bis 0,33 (Bodentiefe 30 cm und 60 cm).

Eine erklärbare Abhängigkeit der WUE von der Bodenwasserversorgung ist nur für die Ahornblättrige Platane in drei Bodentiefen (30, 40, 60 cm) gegeben. Jedoch liegt der Anteil erklärbarer Variabilität

der linearen Modelle je nach Bodentiefe für diese Beziehungen auch hier lediglich zwischen 21 und 34%.

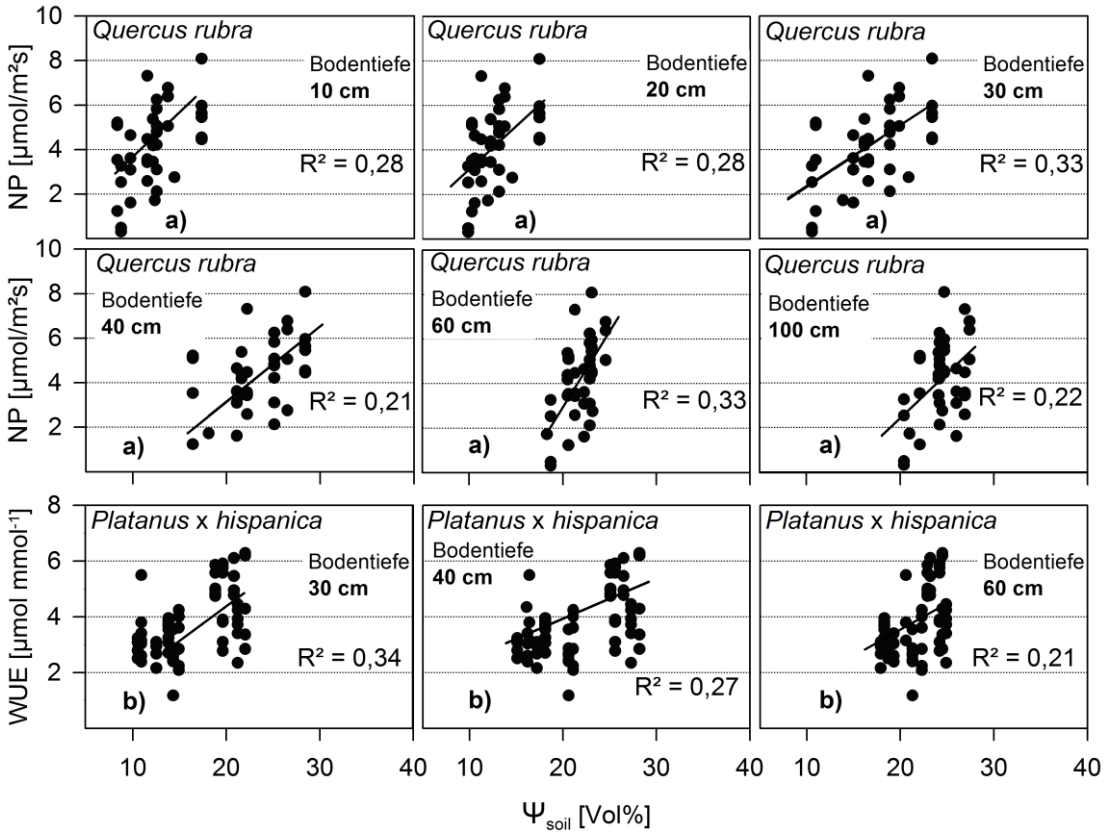


Abbildung 47 Abhängigkeit a) der Netto-Photosynthese (NP) und b) der Effizienz der Wassernutzung (WUE) vom volumetrischen Bodenwassergehalt für die zuvor ermittelten signifikanten Korrelationen der Bodentiefen (vgl. Tab. 14)

Für die Abhängigkeit der Gaswechselparameter vom Bodenmatrixpotential ergeben sich nur in drei Fällen eindeutige Relationen (Abb. 48). Ein Einfluss des Bodenmatrixpotentials auf die Transpirationsleistung und die Nettophotosynthese wurde nur für die Rot-Eiche in einer Bodentiefe von 80 cm festgestellt. Für die Effizienz der Wassernutzung besteht nur für die Platane bei einer Bodentiefe von 40 cm ein nachweisbarer Zusammenhang.

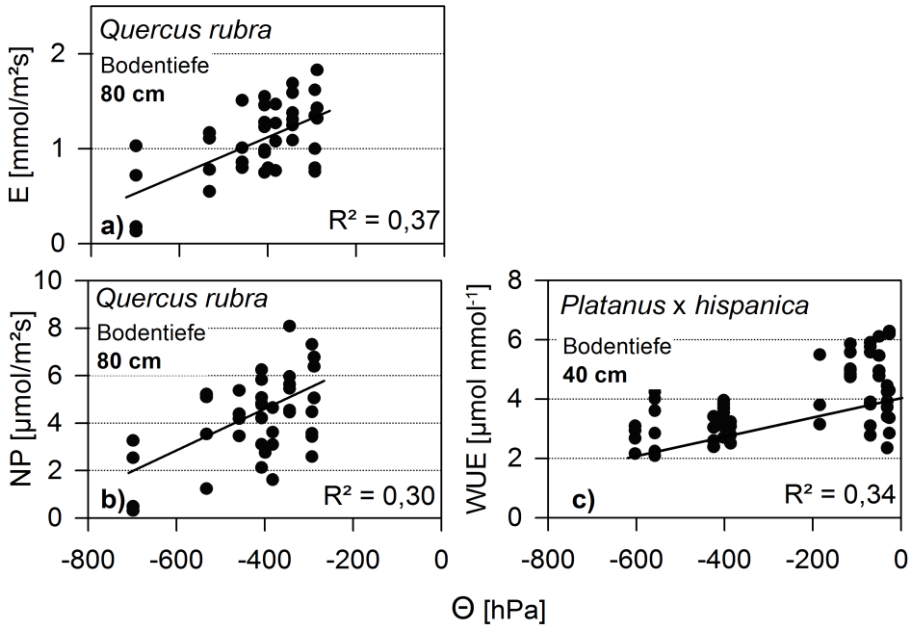


Abbildung 48 Abhängigkeit a) der Transpiration (E), b) der Netto-Photosynthese (NP) und c) der Effizienz der Wassernutzung (WUE) vom Bodenmatrixpotential für die zuvor ermittelten signifikanten Korrelationen der Bodentiefen (vgl. Tab. 14)

In Abbildung 49 sind die Daten der Transpiration, der Netto-Photosynthese und der WUE dem ALVPD gegenübergestellt. Hier ist die Abhängigkeit der Parameter vom ALVP durch deutlich höhere Bestimmtheitsmaße (R^2) zu erkennen, in über der Hälfte der Fälle ergibt sich eine höhere erklärbare Varianz durch das ALVPD als durch den volumetrischen Bodenwassergehalt. Während jedoch für die Rot-Eiche 68% der Varianz der Netto-Photosynthese durch das ALVPD erklärbar sind, liegen die Anteile der erklärbaren Varianz für die Sommer-Linde stets unter 20%. Damit lässt sich für die Sommer-Linde als einzige Baumart keiner der drei Gaswechselparameter, Transpiration, Netto-Photosynthese sowie WUE durch eine lineare Regression zum ALVPD erklären.

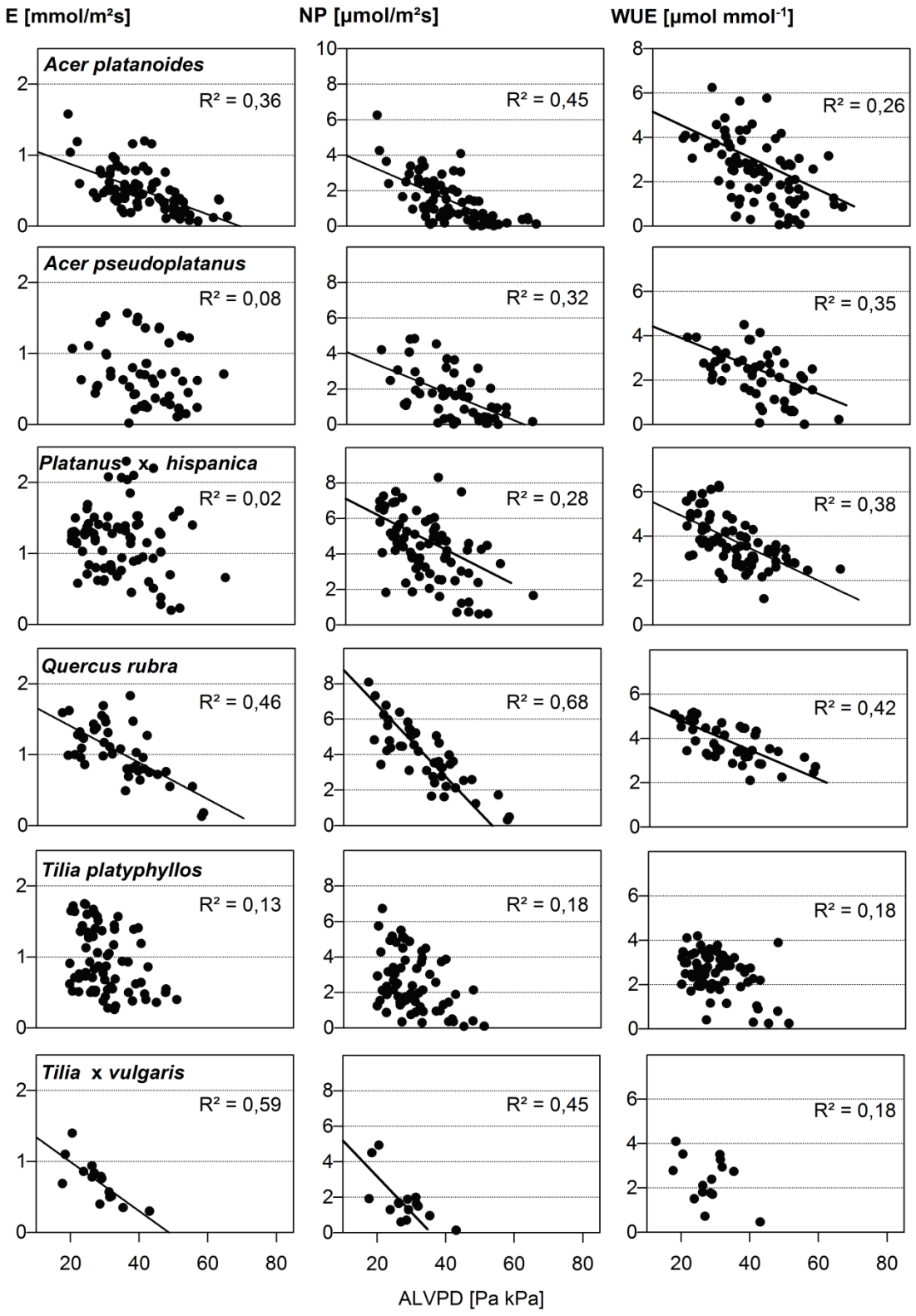


Abbildung 49 Abhängigkeit der Transpiration (E), der Netto-Photosynthese (NP) und der Effizienz der Wassernutzung (WUE) vom ALVPD (vgl. Tab. 14). Für Relationen mit $R^2 > 0,2$ wurden die Regressionsgeraden eingezeichnet.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde mittels einer schrittweisen Regression geprüft, welche Variablen oder Variablenkombination die Varianz der Parameter des Gaswechsels am besten erklärt. In Tabelle 15 sind die Ergebnisse aufgeführt. Auch hier bestätigt sich der starke Einfluss des ALVPD

auf die Gaswechselparameter. Jedoch zeigen die Ergebnisse 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, wie es zum Beispiel für die WUE der Ahornblättrigen Platane zutrifft.

Tabelle 15 Ergebnisse für die schrittweisen Regressionsanalysen. 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 < 0,001)

Transpiration	Faktoren	Intercept	Stdf	FG	R^2	$R^2_{adj.}$
A. platanoides	ALVPD	1,223685	0,24	79	0,36	0,35
A. pseudoplatanus	-	-	-	-	-	-
P. x *hispanica*	-	-	-	-	-	-
Q. rubra	ALVPD	1,90540	0,2842	44	0,46	0,45
T. platyphyllos	ALVPD Sp40 Sp80	1,6867547	0,2756	57	0,61	0,59
T. x *vulgaris*	F20* F30* F40* F60* F80*	0,09451	0,1889	13	0,62	0,59
Netto-Photosynthese						
A. platanoides	ALVPD	4,01055	0,95	79	0,45	0,45
A. pseudoplatanus	ALVPD	4,11459	1,146	53	0,32	0,29
P. x *hispanica*	ALVPD	7,74447	1,555	77	0,28	0,27
Q. rubra	ALVPD	8,76266	1,001	44	0,68	0,67
T. platyphyllos	ALVPD Sp40 Sp80	5,6829014	0,9494	57	0,68	0,67
*T .*x *vulgaris*	ALVPD	5,52568	1,01	13	0,45	0,40
WUE						
A. platanoides	ALVPD	5,45137	1,265	79	0,26	0,25
A. pseudoplatanus	ALVPD	4,155633	0,8859	53	0,35	0,34
P. x *hispanica*	ALVPD F10 F20 F30 F60	16,362899	1,362	56	0,50	0,43
Q. rubra	ALVPD	5,531973	0,6297	44	0,42	0,41
T. platyphyllos	ALVPD Sp40	4,4185735	0,8522	58	0,35	0,33
T. x *vulgaris*	-	-	-	-	-	-

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 Gaswechselparameter ausreichend erklären.

Zu den Ergebnissen für die Holländische Linde auf der Krippener Straße muss bemerkt werden, dass die Werte des Bodenwassergehaltes sehr eng beieinander liegen (vgl. Abb. 37). Aufgrund der Ähnlichkeit der Werte zwischen den Bodentiefen war die schrittweise Variablenselektion 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 aufwiesen (vgl. Tab. 15, F*). Erstellt man ein multiples Modell mit allen Bodentiefen, ergaben sich niedrigere Bestimmtheitsmaße als für das einfach lineare Modell mit den Datenreihen des Bodenwassergehaltes 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 die 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 Standortsbedingungen 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 Vorrausetzungen 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 negativen Exponentialfunktion, eine einfache lineare Regressionsgerade oder eine Hugershoff 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 Gaswechselmessungen 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 Austrockenen und damit sehr niedrigen Bodenmatrixpotentialen 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 Gaswechselmessungen unter konstanten Temperatur- und Lichtbedingungen in der Messkammer von 25°C bzw. einer PAR Quantenstromdichte von 1600 µmol/$m^{-2}s^{-1}$. 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 Lindenchronologien 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 Standortsbedingungen 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 mmol/m²s beobachtet, während die Rot-Eiche in dieser Periode nur bis 1,5 mmol/m²s Wassermoleküle transpiriert. Allerdings ist während der zeitgleichen Messungen das Verhältnis von aufgenommenen CO_2-Molekülen zu transpirierten H_2O -Molekülen statistisch gleich, womit sich die Effizienz der Wassernutzung der beiden Baumarten mit Werten zwischen 3 bis 5 µmol $mmol^{-1}$ 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 mmol/m²s 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 Südrumänien 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 mmol/m²s 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 mmol/m²s 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 µmol/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 wiederstehen. In diese Gruppen können die **Ahornblättrige Platane (*Platanus* x *hispanica*)** und die **Rot-Eiche (*Quercus rubra*)** eingeteilt werden
2. Arten mit einer vergleichsweisen niedrigeren Effizienz der Wassernutzung mit Werten von deutlich unter 3 µmol/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 Modele 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 Wasserdampfsättigungsdampfdruck 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 trockentolerant 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 16 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.
Acer platanoides (Spitz-Ahorn)									
< 30	m	m	N	N	m	m	J	N	m
Acer pseudoplatanus (Berg-Ahorn)									
< 30	n g	n g	N	N	h	n g	J	N	N
Fagus sylvatica (Rot-Buche)									
< 40	n g	n g	m	N	h	n g	J	m	N
Platanus x *hispanica* (Ahornblättrige Platane)									
< 35	g	g	N	J	h	m	J	N	J
Pyrus communis (Kultur-Birne)									
< 15	g	g	m	J	ger	g	J	J	m
Quercus robur subsp. *sessiliflora* (Trauben-Eiche)									
< 30	g	g	J	J	h	m	J	m	J
Quercus rubra (Rot-Eiche)									
< 25	g	g	m	J	h	J	J	m	J
Tilia cordata (Winter-Linde)									
< 40	m	n g	N	N	h	m	J	m	N
Tilia platyphyllos (Sommer-Linde)									
< 40	n g	n g	N	N	h	n g	J	m	N
Tilia x *vulgaris* (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 CO_2 deutlich mehr H_2O 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., EICHELMANN, 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“. Unveröffentliches 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 Troposhärenforschg. Leipzig 13, 126-141

KOIDE, R.T., ROBICHAUX, R.H., MORSE, S.R., SMITH, C.M (1989): Plant water status, hydraulic resistence 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, Suttgart, 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 17 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 18 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 19 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
1922	4	20	-1,5
1922	4	21	-1,5
1922	4	22	-2
1926	5	5	-0,1
1928	4	17	-2,6
1928	5	10	-0,5
1929	4	11	-1,4
1929	4	16	-1,3
1929	4	17	-2,7
1929	4	22	-3,6
1929	4	23	-1,9
1933	4	18	-2,1
1933	4	19	-3,6
1933	4	20	-1,5
1935	5	1	-1,2
1935	5	2	-3,3
1935	5	9	-0,1
1938	4	18	-2,1
1938	4	19	-2,4
1938	4	20	-2,5
1938	4	21	-2,5
1940	4	12	-2,3
1940	4	13	-3,6
1941	5	2	-0,4
1941	5	3	-2,2
1941	5	4	-1,1
1941	5	8	-0,6
1941	5	9	-1,5
1946	4	11	-1,2
1951	4	22	-1,2
1952	5	20	-0,2
1953	5	8	-0,3
1953	5	10	-0,4
1954	4	11	-2,3
1955	4	18	-3,1
1955	4	19	-1,9
1956	4	23	-1,8
1957	4	14	-2,5
1957	5	9	-0,3
1958	4	11	-2,6
1958	4	12	-1,2
1958	4	13	-1,6
1962	5	1	-0,7
1967	4	19	-1,1
1967	4	25	-2
1968	4	12	-2,8
1968	4	13	-1,2
1969	4	18	-1,4
1969	4	19	-2,4
1969	4	20	-2
1971	4	14	-1,7
1972	4	25	-4,3
1975	4	11	-1,4
1976	4	12	-1,4
1976	4	22	-1,4
1976	4	23	-4
1976	4	28	-1,9
1976	4	29	-3
1977	4	11	-2,3
1978	4	16	-1,6
1978	4	19	-1,2
1978	5	11	-3,4
1979	5	4	-0,4
1979	5	6	-0,9
1980	4	20	-1,2
1980	5	4	-0,6
1980	5	5	-2,9
1981	4	17	-3,4
1981	4	18	-4,1
1981	4	19	-2
1981	4	23	-1,3
1981	4	24	-3
1981	4	25	-1,1
1982	4	14	-1,8
1982	4	19	-2,2
1982	4	22	-2
1982	4	23	-1,6
1984	4	27	-3
1984	4	29	-1,9
1985	4	24	-1,1
1986	4	11	-4,4
1986	4	12	-5,8
1986	4	13	-6,3
1986	4	14	-4,3
1988	4	14	-1,8
1988	4	24	-4,3
1988	4	25	-1,5
1988	4	26	-1,5
1989	4	18	-1,4
1991	4	19	-1,8
1991	4	21	-3,7
1991	4	22	-1,6
1991	4	25	-2,2
1993	4	11	-2,1
1994	4	11	-1,3
1996	4	12	-3,9
1996	4	13	-2
1996	4	15	-1,6
1997	4	13	-3,1
1997	4	16	-1,1
1997	4	20	-2,5
1997	4	21	-3,9
1997	4	22	-2,5
2001	4	13	-1,4

Jahr	Monat	Tag	Min.Temp. in °C
1973	4	11	-2,9
1973	4	13	-3
1973	4	14	-2,3
1974	4	14	-2

Jahr	Monat	Tag	Min.Temp. in °C
2001	4	14	-1,1
2003	4	12	-1,1
2005	4	21	-2,1
2005	4	22	-1,8