



Bei jedem Schritt mit der Natur bekommt jemand weit mehr, als er sucht. (John Muir)

# Inhaltsübersicht

<b>DANKSAGUNGEN</b>	<b>VI</b>
<b>KURZFASSUNG</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>X</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>XII</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>XIII</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>XV</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 Stadtbäume im Klimawandel .....	1
1.2 Forschungsziele, Analyserahmen und Publikationsnachweise .....	4
<b>2 STAND DES WISSENS</b> .....	<b>6</b>
2.1 Funktionen von Stadtbäumen .....	6
2.2 Mikroklimatische Regulationsleistungen .....	8
2.2.1 Kühleffekte durch Stadtbäume .....	8
2.2.2 Verschattung .....	10
2.2.3 Kühlung durch Transpiration .....	11
2.3 Änderungen städtischer Wuchsbedingungen und angepasste Gehölzwahl ..	13
2.3.1 Klimawandel und Standort als Doppelbelastung .....	13
2.3.2 Klimagerechte Gehölzwahl.....	16
2.3.3 Anpassungen an Trockenheit.....	21
2.3.4 Auswirkungen der Anpassungen an Trockenheit für die Kühlleistung .....	30
<b>3 METHODIK</b> .....	<b>34</b>
3.1 München als Untersuchungsgebiet.....	35
3.2 Versuchsstandort städtische Baumschule München-Laim .....	36
3.3 Untersuchte Arten und Sorten.....	37
3.4 Anforderungen an die Gehölzverwendung aus Sicht der Praxis .....	43
3.5 Versuchsaufbau.....	43
3.6 Standortklima .....	48
3.7 Edaphische Bedingungen .....	49
3.7.1 Bodenwassergehalt.....	49

3.7.2 Bodenart.....	52
3.8 Baumparameter.....	54
3.8.1 Belaubung und Kronenstruktur .....	54
3.8.2 Frühjahrs- und Herbstphänologie .....	59
3.8.3 Xylemflussmessungen.....	61
3.8.4 Stammzuwachs und tageszeitliche Dickenschwankungen.....	68
3.8.5 Wurzelmasse, Wurzel-Spross-Verhältnis und Wurzelarchitektur .....	70
3.9 Statistische und grafische Auswertung .....	76
<b>4 ERGEBNISSE.....</b>	<b>78</b>
4.1 Umweltbedingungen .....	78
4.1.1 Klimatische Bedingungen.....	78
4.1.2 Bodenart und -austrocknung .....	80
4.2 Belaubung und Kronenstruktur .....	82
4.3 Frühjahrs- und Herbstphänologie.....	84
4.4 Wasserverbrauch .....	88
4.4.1 Xylemflussdichte und Saftfluss im Jahresverlauf .....	88
4.4.2 Wasserverbrauch in Abhängigkeit von Umweltvariablen .....	93
4.4.3 Skalierter Wasserverbrauch pro Quadratmeter Kronen- und Blattfläche .....	98
4.5 Durchmesserwachstum im Jahresverlauf .....	102
4.6 Tagesdynamiken der Xylemfluss- und Dendrometerwerte .....	107
4.7 Wassernutzungseffizienz.....	112
4.8 Wurzelbiomasse und Wurzel-Spross-Verhältnis .....	117
<b>5 DISKUSSION .....</b>	<b>122</b>
5.1 Art- und sortenspezifische Physiologie im Jahresverlauf .....	123
5.2 Art- und sortenspezifische Reaktionen auf Trockenheit.....	127
5.2.1 Atmosphärische Trockenheit: Stomatäre Sensitivität .....	127
5.2.2 Isohydrische und anisohydrische Wasserverbrauchsmuster.....	129
5.2.3 Trockenheitstoleranz und -resistenz .....	133
5.3 Zielkonflikt zwischen Trockenheitstoleranz und Kühlpotenzial .....	142
5.4 Verwendungshinweise für bestmögliche Kühlleistung .....	145
5.5 Methodendiskussion .....	148
<b>6 SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>151</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>158</b>
<b>ANHANG .....</b>	<b>173</b>



## Danksagungen

Den Weg zu einem ökologisch orientierten Studium, das mit der Anfertigung dieser Dissertation endet, hat mir meine Familie geebnet. Ich danke meinen Eltern Annemarie und Sakis, dass ihr mich ganz zwanglos zu einem wissbegierigen und naturverbundenen Menschen erzogen habt. Meine Begeisterung für die Pflanzen verdanke auch meinem Onkel Willi und seinem bezaubernden Garten. Darüber hinaus gilt all meinen Liebsten ein besonderer Dank für die Unterstützung, die Geduld und die Blumen.

Ich danke meinen Betreuern Swantje Duthweiler und Stephan Pauleit, die jeder auf seine ganz eigene Weise zum Gelingen dieser Promotion beigetragen haben. Vielen Dank Stephan für die enge Zusammenarbeit, Deinen allumfassenden klaren Blick und Deine uneigennützig Art. Ich danke Dir Swantje für Deinen stetigen Glauben in die Qualität meiner Arbeit und Deinen bisweilen ansteckenden Wissensdrang.

Ein herzlicher Dank gilt auch meinem Mentor Karl-Heinz Häberle. Deine Kenntnisse zur Ökophysiologie der Pflanzen waren Gold wert. Darüber hinaus schätze ich sehr Deine unverfälschte und verbindliche Art. Auch Thomas Rötzer möchte ich danken für seine Hilfe bezüglich der Konzeption meines Versuchsdesigns. Du hast mir zur richtigen Zeit die richtigen Worte gesagt, woraufhin meine Promotion ihre Gangart wechselte. Vielen Dank an Mohammad Rahman und Astrid Moser-Reischl für eine bereichernde Zeit in unserer Forschungsgruppe.

Leander Wilhelm, Peter Schlinsog, Wolfgang Reich und dem gesamten Team der städtischen Baumschule München-Laim möchte ich für ihre herausragende Unterstützung bei meinen Versuchen danken. Ich blicke ein wenig wehmütig auf diesen besonderen Ort zurück. Ich danke Jinchen Liu von der Firma Ecomatik für seine nette Unterstützung, die weit über das Geschäftliche hinausging. Vielen Dank Michael Beck und Johann Hainzinger für ihre Hilfe bei der Messtechnik. Ich danke Klaus Menrad, Paul Lampert und Dorothea Rönsch für die Organisation unseres Graduiertenkollegs und dem Bayerischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst für die Finanzierung. Vielen Dank den studentischen Hilfskräften und all meinen netten Kollegen/innen an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und der Technischen Universität München.

Es war schön mit euch.

## Kurzfassung

Die vielen Vorzüge, die urbane Vegetation für die Menschen bringt, erfahren eine zunehmende Wertschätzung aufgrund der Besorgnis über den Klimawandel und weltweite Verstädterung. Insbesondere die Pflanzung von Stadtbäumen ist eine gleichermaßen wichtige Maßnahme zum Klimaschutz und der Klimaanpassung, da sie vielfältige Ökosystemleistungen erbringen. Die Regulation des städtischen Mikroklimas ist eine dieser Leistungen und meint das Potenzial von Bäumen, durch Verschattung und Transpiration städtische Hitzebelastungen zu reduzieren. Gleichzeitig wächst, insbesondere für den Straßenraum, die Notwendigkeit zur Verwendung von Gehölzen aus trockenen Lebensbereichen, die mit der zunehmenden Dürregefahr in Mitteleuropa gut zurechtkommen. Einige der sie hierzu befähigenden Eigenschaften können jedoch eine geringere Biomasseproduktion und eingeschränkten Wasserverbrauch bedingen. Aufgrund der hohen Korrelation der Verschattung und der Kühlung durch Transpiration mit diesen Parametern, ist davon auszugehen, dass das vermehrte Pflanzen an Trockenheit angepasster Gehölze zu geringeren Kühleffekten führt.

Diese Dissertation hat das Ziel, das Wissen über den bislang wenig erforschten Zielkonflikt zwischen Kühlleistung und Trockenheitstoleranz zu erhöhen. Dafür wurden in einer zweijährigen Messkampagne in Münchens städtischer Baumschule sechs häufig gepflanzte Straßenbaumarten und -sorten untersucht, welche aus Lebensbereichen mit unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit stammen. *Acer platanoides*, *Carpinus betulus* 'Fastigiata' und *Tilia cordata* 'Greenspire' aus artenreichen Wäldern und Gehölzgruppen (Lebensbereich 3) wurden verglichen mit *Acer campestre*, *Ostrya carpinifolia* und *Tilia tomentosa* 'Brabant' aus Steppengehölzen und Trockenwäldern (Lebensbereich 6), wobei letzteren eine höhere Trockenheitstoleranz zugeschrieben wird. Die Kühlpotenziale dieser Gehölze wurden abgeleitet aus Messungen der Biomasseproduktion und des Wasserverbrauches unter wechselnden atmosphärischen und edaphischen Bedingungen innerhalb einer zweijährigen Messkampagne, die auch ein Austrocknungsexperiment beinhaltete.

Bei ausreichend Bodenwasserverfügbarkeit und während kurzen Trockenphasen wiesen die Gehölze aus Lebensbereich 6 1,12-fach höhere Maximalwerte der täglichen Xylemflussdichte und ein bis zu 7-fach höheres Wachstum auf, was in Kombination eine

höhere Wassernutzungseffizienz bedingte. Standardisiert auf die Blattfläche waren ihre mittleren Transpirationsmengen jedoch niedriger (Lebensbereich 3:  $0,19 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ , Lebensbereich 6:  $0,17 \text{ kg H}_2\text{O m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ). Dies stand im Zusammenhang mit ihrer empfindlichen stomatären Regulation zu Zeiten hoher Evapotranspirationsbelastung. Während des Austrocknungsexperimentes im zweiten Versuchsjahr konnten die ausgetrockneten heimischen Gehölze aus dem frischeren Lebensbereich nur 48 % des Xylemflusses ihrer Kontrollen aufbringen und unter ihnen zeigte *Tilia cordata* 'Greenspire' die niedrigste Resistenz in Verbindung mit vorzeitigem Blattfall. Die Gehölze aus dem trockeneren Lebensbereich wiesen beim Wasserverbrauch höhere Resistenzen auf (60 %), zeigten jedoch niedrigere Resistenzen beim Stammwachstum, was, Beobachtungen bei *Tilia tomentosa* 'Brabant' zufolge, zugunsten einer höheren (Fein-)Wurzelentwicklung in tiefere Bodenschichten geschah. Darüber hinaus stand die Trockenheitstoleranz der Gehölze im Zusammenhang mit ihrer spezifischen Kohlenstoffpartitionierung. Ein besonders hohes Wurzel-Spross-Verhältnis führte bei *Acer campestre* zu einer geringen Anfälligkeit gegenüber Trockenheit. Die hohe Nutzung von stammintern gespeichertem Wasser war eine weitere Anpassung, die den Gehölzen aus Lebensbereich 6 dazu verhalf, ihre physiologischen Funktionen bei starker Trockenheit aufrechtzuerhalten. Ungeachtet der herkunftsbedingten Unterschiede wurden die Kronendimensionen und die Blattfläche als wichtige Einflussgrößen für Unterschiede im Wasserverbrauch identifiziert.

Die Ergebnisse zeigten, dass ein vermehrtes Pflanzen trockenheitsadaptierter Gehölze zu geringeren Kühlleistungen führen wird. *Tilia tomentosa* 'Brabant', welche auf einer Wurzelunterlage der heimischen *Tilia platyphyllos* veredelt wurde, bildete eine vielversprechende Ausnahme, indem sie sowohl ein hohes Kühlpotenzial als auch eine hohe Trockenheitstoleranz aufwies. Ferner stellten sich bei intensiver Trockenheit einige Anpassungen trockenheitstoleranter Gehölze als unverzichtbar heraus, um eine konstante Kühlleistung aufrechtzuerhalten. Die hohe Investition in die unterirdische Wurzelbiomasse und eine stärkere Nutzung stamminterner Wasserspeicher ermöglichten es ihnen, ihren Wasserverbrauch aufrecht zu erhalten und gesunde Blätter bis in den Herbst hinein zu tragen. Die heimischen Arten und Sorten mit einer geringeren stomatären Regulation und einer hohen Investition in die oberirdische Blattbiomasse stießen hingegen teilweise an die Grenzen ihrer Anpassungsfähigkeit, was insbesondere

im Fall von *Tilia cordata* 'Greenspire' ein deutlich reduziertes und verkürztes Kühlpotenzial bedingte.

Der ursprüngliche Lebensbereich hat sich als nützliches Kriterium zur Bewertung der Trockenheitstoleranz und des Kühlpotenzials von Arten und Sorten herausgestellt. Damit kann zukünftig die Pflanzenauswahl für unterschiedliche Wuchssituationen optimiert werden. Gehölze aus trockenen Lebensbereichen sind für hochversiegelte Wuchsorte vorzusehen, wo sie aufgrund ihrer Anpassungen an Trockenheit relativ geringe aber konstante Kühlleistungen erbringen können. Heimische Gehölze aus frischeren Lebensbereichen sollten hingegen in parkähnlichen Situationen oder in Pflanzgruben mit optimierten Substraten gepflanzt werden, wo sie einen hohen Beitrag zur Kühlung der Städte leisten können. Weitere Forschung ist notwendig, um den Lebensbereich als relevante Entscheidungsgrundlage zu etablieren. Fundierte Kenntnisse in diesem Bereich können zu einer strategischen Erhöhung der genetischen Vielfalt beitragen, was einen Gewinn für die Klimaanpassung und die Widerstandfähigkeit innerstädtischer Pflanzbestände bedeuten würde.

## Abstract

Vegetation in urban areas provides benefits to people, which are increasingly valued based on concerns over climate change and global urbanization. In particular, urban trees have proven to be an important mitigation and adaptation tool for climate change, thanks to their provision of numerous ecosystem services. The regulation of the urban microclimate is one of these services, since trees have the potential to reduce urban heat loads by transpiration and shading. Simultaneously, there is a necessity to select trees from dry habitats capable of coping with the increasing risks of drought under climate change in Central Europe, especially for future roadside plantings. Some of their underlying properties that enable them to do so, however, are assumed to come at the expense of biomass production and water loss. Since the magnitude of transpiration cooling and shading is highly dependent on these parameters, planting more drought tolerant trees is expected to come at the expense of their cooling potential.

This thesis aims at increasing the understanding of this scarcely researched trade-off between drought tolerance and microclimate regulation. In order to do so, the cooling potentials of six frequently planted roadside species and cultivars, originating from two contrasting habitats in terms of water availability, have been studied in a two-year measurement campaign in the municipal nursery of Munich. *Acer platanoides*, *Carpinus betulus* 'Fastigiata', and *Tilia cordata* 'Greenspire' from species-rich forests and woodlands (habitat 3) were compared with *Acer campestre*, *Ostrya carpinifolia*, and *Tilia tomentosa* 'Brabant' from steppes and dry forests (habitat 6), the latter presumably being more tolerant to drought. Measurements of the biomass production and water consumption have been conducted under changing atmospheric and edaphic conditions throughout the years, including a long-running drought experiment.

Under conditions of ample water supply and short periods of drought the trees of habitat 6 showed on average 1.12 times higher values of maximum daily sap flux density and up to seven times higher growth rates, both contributing to higher water-use efficiency. Scaled to leaf level, however, their mean daily transpiration rates were on average lower (H3: 0.19 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> and H6: 0.17 kg H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>, respectively). This was linked to a higher regulation of water use at high evaporative demand. During the drought experiment in the second study year, desiccated native species and cultivars

from the mesic habitat maintained only 48 % of their controls sap flux and of these species and cultivars, *Tilia cordata* 'Greenspire' showed lowest resistance associated with premature leaf senescence. Trees from the drier habitat had less reduction in water use (60 %) but lower stem growth, possibly favouring (fine) root development into deeper soil layers, as observed for *Tilia tomentosa* 'Brabant'. Furthermore, drought tolerance was linked to within-plant carbon partitioning. A particularly high root-shoot-ratio measured for *Acer campestre* made it less susceptible to droughts. Higher stem water exploitation was observed as an additional reaction pattern that likely helped trees from habitat 6 to maintain good physiological functions under severe drought. Beside differences caused by origin, canopy size and leaf amount turned out to be important determinants of species and cultivar differences in water use.

The results suggest that planting trees from dry habitats will lead to less thermal regulation. *Tilia tomentosa* 'Brabant', which was grafted on a root system of native *T. platyphyllos* was a promising exception showing both high cooling potential and drought tolerance. Furthermore, under severe drought some adaptations to drought turned out to be essential for maintaining constant cooling. The high investment in the below-ground biomass and the use of water from internal storages enabled species and cultivars from the drier habitat to maintain hydraulic functioning and keep healthy leaves until autumn. The more water demanding native species and cultivars with lower stomatal control and a high investment in the above-ground biomass in turn partly lost their climatic suitability, which led to a distinctly reduced and shortened cooling potential, particularly in the case of *Tilia cordata* 'Greenspire'.

The native habitat appeared to be a valuable criterion to estimate species' and cultivars' drought tolerance and cooling potential. It can help to improve the choice of species for different planting situations. Trees from dry habitats are recommended for extreme urban environments where they are expected to have a relatively low but constant cooling capacity due to their adaptations to drought. Native trees from more mesic habitats should rather be planted in park-like environments or planting pits with advanced substrates, where they can provide high thermal regulation. More research is needed to establish the native habitat as a relevant tool to support decision making. Profound knowledge on this aspect can lead to a strategic enhancement of the genetic diversity that will constitute real progress towards climate change adaptation and the overall resilience of inner-city plant stocks.

## Abkürzungsverzeichnis

$A_c$	Kronenprojektionsfläche
$A_s$	Splintholzfläche
$Ac$	<i>Acer campestre</i> – Feld-Ahorn
ANOVA	Varianzanalyse (engl. <b>analysis of variance</b> )
$Ap$	<i>Acer platanoides</i> – Spitz-Ahorn
$Cb$	<i>Carpinus betulus</i> 'Fastigiata' – Säulen-Hainbuche
$D_z$	Auf die Tageslänge normalisiertes Sättigungsdefizit der Luft
$E_c$	Transpiration pro Quadratmeter Kronenfläche
$E_L$	Transpiration pro Quadratmeter Blattfläche
$J_s$	Xylemflussdichte
LAI	Blattflächenindex (engl. <b>leaf area index</b> )
LB	<b>Lebensbereich</b>
M	<b>Mittelwert</b>
Med	<b>Median</b>
Min	<b>Minimum</b>
Max	<b>Maximum</b>
n	Stichprobenzahl
$Oc$	<i>Ostrya carpinifolia</i> - Hopfenbuche
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung (engl. <b>photosynthetically active radiation</b> )
r	Korrelationskoeffizient nach Pearson
$r_s$	Spearman'sche Rangkorrelation
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$R_{tk}$	Trockenheitsresistenz
$\Sigma$	Summe
SF	Saftfluss
$\pm$ SD	Standardabweichung (engl. <b>standard deviation</b> )
$Tc$	<i>Tilia cordata</i> 'Greenspire' – Amerikanische Stadt-Linde
$Tt$	<i>Tilia tomentosa</i> 'Brabant' – Brabanter Silber-Linde
VPD	Sättigungsdefizit der Luft (engl. <b>vapor pressure deficit</b> )
WUE	Wassernutzungseffizienz (engl. <b>water-use efficiency</b> )

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Analyserahmen der Dissertation und Publikationsnachweise .....	5
Abbildung 2. Änderung der Mitteltemperatur in 2 m Höhe und der Anzahl der heißen Tage mit einer Maximaltemperatur > 30 °C im Münchener Stadtgebiet bis 2099 ..	14
Abbildung 3. Übersicht der Lebensbereiche aus Kiermeier .....	19
Abbildung 4. Schematisierte Darstellung des Habitus und der Evapotranspiration von zwei kontrastierenden Stadtbaumarten .....	31
Abbildung 5. Gesamtmethodik der Dissertation .....	34
Abbildung 6. Münchner Straßenbäume nach Gattungen .....	38
Abbildung 7. Oberirdische Kabelführung entlang der Baumkronen.....	45
Abbildung 8. Areal der städtischen Baumschule München-Laim .....	46
Abbildung 9. Schematisierter Aufbau des Regenausschlussexperiments.....	48
Abbildung 10. Messprinzip des LAI-2000.....	58
Abbildung 11. Binärbilder der Wurzelbereiche von vier Arten und Sorten.....	73
Abbildung 12. Übersicht der gemessenen Baum- und Umgebungsparameter .....	75
Abbildung 13. Klimavariablen und Bodenfeuchte für 2016 und 2017.....	78
Abbildung 14. Volumetrische Bodenwassergehalte in 10 cm Bodentiefe .....	82
Abbildung 15. Eintrittszeitpunkte der phänologischen Stadien der Blattentwicklung ....	86
Abbildung 16. Vorzeitiger Blattfall bei der Amerikanischen Stadt-Linde im Spätsommer .....	87
Abbildung 17. Jahresgang der Xylemflussdichte und ausgewählter Klimadaten 2017 ..	90
Abbildung 18. Jahresgang des Saftflusses und phänologische Eintrittstermine 2017 ...	92
Abbildung 19. Tagessummen der Xylemflussdichte in Abhängigkeit vom Sättigungsdefizit der Luft .....	95
Abbildung 20. Tagessummen der Xylemflussdichte in Abhängigkeit von der photosynthetisch aktiven Strahlung.....	98
Abbildung 21. Wasserverbrauch pro Quadratmeter Kronen- und Blattfläche .....	100
Abbildung 22. Relatives monatliches Stammwachstum .....	103
Abbildung 23. Kontinuierliche Änderungen der Stammdurchmesser der Linden.....	107
Abbildung 24. Tagesdynamik der Xylemflussdichte von Spitz- und Feld-Ahorn.....	108
Abbildung 25. Tagesdynamik der Xylemflussdichte von Säulen-Hainbuche und Hopfenbuche.....	109

Abbildung 26. Tagesdynamik der Xylemflussdichte und der Stammdurchmesser von Amerikanischer Stadt-Linde und Brabanter Silber-Linde.....	110
Abbildung 27. Monatliche Stammzuwächse und Wasserverbrauch.....	112
Abbildung 28. Wassernutzungseffizienz.....	114
Abbildung 29. Vergleich des Trockengewichts der Kompartimente Zweige, Stamm und Wurzeln.....	119
Abbildung 30. Entwicklung der Feinwurzelbiomasse der Linden.....	138

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Geographische Herkunft und Einordnung der Schatten- und Trockenheitstoleranz der sechs untersuchten Arten und Sorten .....	42
Tabelle 2. Basisdaten der untersuchten Arten und Sorten.....	44
Tabelle 3. Korngrößenverteilung und Bodenart in den Quartieren.....	53
Tabelle 4. BBCH-Skala zur Beschreibung phänologischer Entwicklungsstadien perennierender Pflanzen .....	60
Tabelle 5. Klimawerte für die Versuchsjahre 2016 und 2017 und den Bezugszeitraum 1981-2010 .....	79
Tabelle 6. Kronendimensionen und Blattflächenindex .....	83
Tabelle 7. Modellparameter für die Korrelationen der täglichen Xylemflusswerte mit atmosphärischen Triebkräften .....	96
Tabelle 8. Deskriptive Statistik, Resistenzen und Mittelwertvergleiche zum Durchmesserwachstum.....	106
Tabelle 9. Deskriptive Statistik zu Trockengewicht und Wurzel-Spross-Verhältnis.....	118
Tabelle 10. Dimensionen der ausgehobenen Wurzelbiomasse.....	121
Tabelle 11. Gegenüberstellung von Kühlpotenzial und Trockenheitstoleranz .....	143

# 1 Einleitung

## 1.1 Stadtbäume im Klimawandel

Der Klimawandel ist eine große Herausforderung für die Menschheit und ein globales Problem. Wesentliche Ursache dafür ist die seit Beginn der Industrialisierung stark angestiegene Nutzung fossiler Energien und damit verbundene Treibhausgasemissionen (v.a. Kohlendioxid CO<sub>2</sub>, Methan CH<sub>4</sub> und Lachgas N<sub>2</sub>O). Der fünfte Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013) prognostiziert bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erwärmung der globalen Oberflächentemperatur um 0,3 °C bis 4,8 °C je nach zukünftiger Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre (IPCC 2013, S. 20). Darüber hinaus wird eine Zunahme in der Häufigkeit, Andauer und Intensität extremer Wetterereignisse erwartet (IPCC 2013, S. 7).

Die Sommer 2003, 2015 und 2018 zeigten deutlich die mit dem Klimawandel verbundenen negativen Auswirkungen für die Lebensqualität der Menschen. Langanhaltende Hitzeperioden und Hitzerekorde beeinträchtigen zunehmend die Gesundheit der Bevölkerung. Sommerlicher Hitzestress wirkt sich bisweilen sogar lebensbedrohlich für Risikogruppen aus, wie im Extremjahr 2003, als es in Europa zu deutlich erhöhten Todesfällen kam (Robine et al., 2008). Besonders gravierend ist die Situation in Städten aufgrund der spezifischen klimatischen Verhältnisse. Das Stadtklima wurde 1981 im Rahmen einer Kommission für Klimatologie der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) definiert als ein „durch die Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen (einschließlich Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen) modifiziertes Klima“ (WMO, 1983). Es wird unter anderem charakterisiert durch eine positive Temperaturdifferenz zwischen der Stadt und dem Umland, die vor allem entsteht durch die Wärmespeicherung der verwendeten Baumaterialien bei einem gleichzeitigen Fehlen natürlicher Flächen, der Straßenschlucht-Geometrie und den Luftverunreinigungen und Wärmeemissionen (Oke, 1982). Dieses Phänomen, welches als städtische Wärmeinsel (engl. *urban heat island*) bezeichnet wird (Oke, 2011), weist eine positive Korrelation mit der Größe der städtischen Agglomeration auf und kann in Europa zur Sommerzeit im Mittel bis zu 3 °C betragen (Zhou et al., 2013). Gemäß dem Deutschen Wetterdienst (DWD) (2019c)

beträgt der Effekt in deutschen Städten bei wolkenfreien und windschwachen Wetterlagen während der Nacht sogar bis zu 10 °C.

Diesen spezifischen Bedingungen ist ein stetig wachsender Anteil der Menschheit ausgesetzt. Projektionen zufolge soll der Prozentsatz von Menschen, die in Städten leben, von aktuell rund 50 % auf fast 70 % im Jahr 2050 ansteigen (United Nations, 2019, S. 10), was zwei Milliarden mehr Menschen entspricht. In Deutschland lebten 2018 bereits 77 % der Bevölkerung im urbanen Raum (United Nations, 2018). Der zunehmende Bevölkerungsdruck auf die Städte und die Folgen des Klimawandels stellen große Herausforderungen für Städte und Kommunen dar und erfordern integrierte Maßnahmen zur Senkung der Treibhausgasemissionen, und somit dem Klimaschutz, einerseits und zur Anpassung an die bereits spürbaren Folgen des Klimawandels andererseits.

Eine Klimaanpassungsmaßnahme, welche zunehmend Aufmerksamkeit erfährt (Zölch et al., 2016), ist die Nutzung der klimatischen Regulationsleistungen von Stadtbäumen. Sie haben das Potenzial, durch Verschattung, Transpiration als auch durch die Beeinflussung der Durchlüftung das urbane Mikroklima zu regulieren und verschattete Oberflächen abzukühlen (Armson et al., 2012; Gillner et al., 2015b; Jiao et al., 2017; Rahman et al., 2017b). Die Bäume, welche diese Leistungen erbringen sollen, leiden jedoch zunehmend unter dem Klimawandel und der städtischen Wärmeinsel, welche sich im Zuge der fortschreitenden Urbanisierung noch weiter verstärkt. Zwar sind durch die erhöhten Temperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen positive Wachstumseffekte an Stadtbäumen zu beobachten (Pretzsch et al., 2017). An Orten mit einem hohen Versiegelungsgrad und einem limitierten Wurzelraum, wie an Straßen, auf Plätzen und Parkplätzen oder in Fußgängerzonen (Moser et al., 2017; Rahman et al., 2017a), ist ihre Vitalität jedoch zunehmend gefährdet. Aufgrund steigender Urbanisierung und Nachverdichtung herrscht hier eine starke Funktionskonkurrenz. Beispielsweise finden Bäume aufgrund unterirdischer Versorgungsleitungen oder im Zuge des Ausbaus nachhaltiger Mobilitätskonzepte (z.B. erweiterte Radwege) wenig Wurzelraum vor. Insbesondere bei den häufig verwendeten heimischen Arten und Sorten treten zunehmend Hitze- und Trockenstresssymptome auf (Uehre & Herrmann, 2017), was sie auch anfälliger gegenüber Krankheiten und Schädlingen macht (McDowell et al.,

2008). Aus diesen Gründen wird im Zuge der Erweiterung des eingeschränkten Repertoires von Stadtbaumarten nach stresstoleranten Gehölzen gesucht, um widerstandsfähige Stadtbaumsortimente zu erschaffen (Böll, 2017). Dabei sind hitzetolerante Baumarten nicht notwendigerweise auch trockenheitstolerant (Moser et al., 2017; Uehre & Herrmann, 2017). So erreichten bei Messungen von Moser et al. (2017) ausgewachsene Winter-Linden in München innerhalb eines sehr warmen und trockenen Jahres hohe Wuchs- und Transpirationsleistungen an naturnahen Standorten mit relativ hoher Wasserverfügbarkeit. Winter-Linden an stark versiegelten Standorten in der Stadt mit einem geringen Wurzelraum wiesen hingegen starke Einbrüche der Transpiration und des Wachstums auf – sowohl im Trockenjahr selbst, als auch in den Folgejahren. Um zu klären, welche Arten und Sorten in der Lage sind, den erwarteten Klimaveränderungen in den kommenden Jahrzehnten erfolgreich zu begegnen, gibt es alleine in Deutschland eine Reihe von Straßen-, Stadt-, Alleebaumtests und theoretischen Ansätzen für die Baumartenwahl (z.B. GALK Straßenbaumtest, Stadtgrün 2021, KLAM Stadt). Vielversprechend erscheint die Beurteilung der Zukunftseignung von Gehölzen anhand ihrer Stressbelastung im ursprünglichen Lebensraum. Bäume von Trockenstandorten besitzen kurz-, mittel- und langfristige physiologische Reaktionen und anatomische Anpassungen zur Verhinderung von Schädigungen durch Wassermangel (Roloff et al., 2013). Die Wasserabgabe an die Atmosphäre wird vermindert durch eine reduzierte Blattoberfläche mit xeromorphen Strukturen, die im Kontrast steht zu einem intensiven Wurzelwerk, und durch erhöhte stomatäre Regulation (Lösch 2001 S. 396ff.). Aufgrund der unmittelbaren Abhängigkeiten des Ausmaßes der pflanzlichen Wasserabgabe von der Größe der transpirierenden Blattoberfläche einerseits und der Kohlenstoffassimilation von der stomatären Leitfähigkeit andererseits, führen ein hohes Wurzel-Spross-Verhältnis und eine empfindliche stomatäre Regulation zu einer geringeren Biomasseproduktion und einem eingeschränkten Wasserverbrauch. Da die Kühlleistung von Stadtbäumen stark mit den Strukturparametern von Bäumen (Gillner et al., 2015b; Jiao et al., 2017) und ihrem Wasserverbrauch (Rahman et al., 2017b) korreliert, können diese Anpassungen an Trockenheit zu einer geringeren Verschattung und Kühlung durch Transpiration führen. Andererseits sorgen intensive Wurzelsysteme für eine gesteigerte Wasseraufnahme (Lösch 2001, S. 396ff.) und durch die Nutzung pflanzeninterner Wasserspeicher können Wasserverluste zeitweilig kompensiert werden (Lösch 2001, S. 402ff.), wodurch die

physiologischen Funktionen auch bei starker Trockenheit aufrechterhalten werden können.

Die Fragen nach der Zukunftseignung von Arten aus unterschiedlichen Lebensbereichen einerseits und der Kühlleistung von Stadtbäumen andererseits wurden bislang weitgehend getrennt voneinander gestellt. Während die Stadtbaumtests das Thema der Trockenheitstoleranz in den Vordergrund stellen mit dem Ziel, praxistaugliche, regional angepasste Empfehlungen für die Gehölzverwendung in der Stadt auszusprechen, wird eher mit einem stadtklimatischen Fokus an den Kühlleistungen von Stadtbäumen geforscht. Selten wurde jedoch versucht, diese beiden Forschungsdisziplinen zu verbinden beziehungsweise die Frage nach Rolle der Herkunft einer Baumart für ihre Biomasseproduktion und ihren Wasserverbrauch (McCarthy et al., 2011; Pataki et al., 2011) oder – unmittelbarer – ihre Kühlleistung gestellt. Der Versuch einer gemeinsamen Betrachtung wird dadurch erschwert, dass für viele Arten und Sorten, insbesondere aber für nicht-heimische Gehölze, kaum experimentell gewonnene Daten vorliegen.

## **1.2 Forschungsziele, Analyserahmen und Publikationsnachweise**

Die Dissertation widmet sich der Frage, was eine Verwendung von Baumarten und Sorten aus einem vergleichsweise trockenen Lebensbereich als Ersatz für häufig verwendete heimische Baumarten und Sorten für die zu erwartende Verschattung und Kühlung durch Transpiration bedeutet. Die *Kühlleistung* wurde dafür nicht direkt bestimmt, sondern aus Messungen zur Biomasseproduktion und zum Wasserverbrauch der Versuchsbäume abgeleitet (*Kühlpotenzial*). Zur Ermittlung der Kühlpotenziale von Arten und Sorten mit unterschiedlicher Herkunft hatte die Dissertation die folgenden Ziele:

- (1) Analyse herkunftsbedingter Unterschiede der Biomasseproduktion und des Wasserverbrauches und somit des Kühlpotenzials von Gehölzen im Jahresverlauf
- (2) Verbesserung des Verständnisses der Reaktion von Gehölzen unterschiedlicher Herkunft auf wechselnde Umweltbedingungen inklusive starker Bodentrockenheit und damit verbundene Konsequenzen für das Kühlpotenzial

- (3) Untersuchung der Formen der Dürreanpassung der Gehölze aus einem Lebensbereich mit Sommertrockenheit und ihre Auswirkungen auf das Kühlpotenzial
- (4) Ableitung von Empfehlungen für die zukünftige klimaangepasste Wahl von Stadtbaumarten und -sorten

Die **Forschungsziele 1-3** wurden sukzessive in aufeinander aufbauenden **Teiluntersuchungen** bearbeitet. Im Anschluss an jede Teiluntersuchung erfolgte, parallel zu den laufenden Folgeuntersuchungen, eine Datenanalyse und die Publikation ausgewählter Ergebnisse in einer begutachteten Fachzeitschrift (Abb. 1). Demnach bezieht sich jede Publikation nur auf einen beschränkten Untersuchungszeitraum. In dieser Dissertation wurden hingegen an geeigneten Stellen Daten der gesamten Messkampagne für statistische Analysen zusammengefasst oder Messjahre gegenübergestellt. Ferner enthält die Dissertation eine umfassende Synthese aller Untersuchungsergebnisse, woraus Empfehlungen für eine zukünftige klimaangepasste Wahl von Stadtbaumarten und -sorten abgeleitet werden konnten (**Forschungsziel 4**). Darüber hinaus wurden in einer Metaanalyse zu Kühleffekten von Stadtbäumen (Rahman et al., 2020) die Untersuchungsergebnisse gemeinsam mit elf weiteren Studien ausgewertet, um allgemeingültige Mechanismen der Kühlung durch Transpiration aufzudecken.

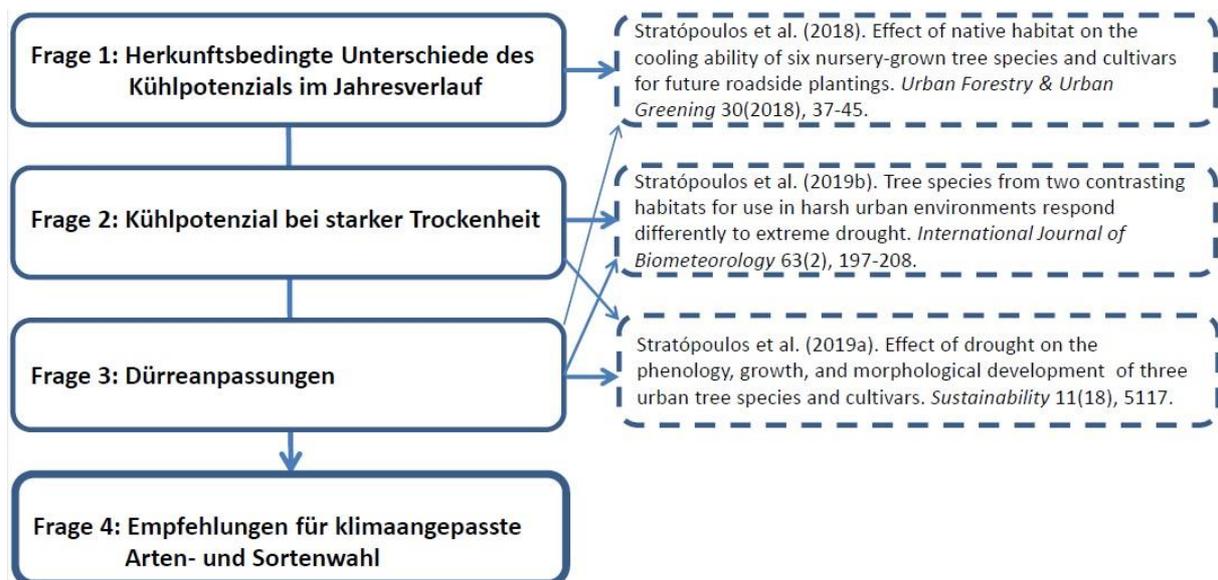


Abbildung 1. Analyserahmen der Dissertation und Publikationsnachweise. Die Pfeilstärken zeigen an, welche Forschungsfragen zu welcher Intensität in den Publikationen bearbeitet wurden.

## **2 Stand des Wissens**

Zum Verständnis des Untersuchungsgegenstandes werden zunächst die theoretischen Grundlagen zu Ökosystemleistungen von Stadtbäumen (Kap. 2.1) und, im speziellen, zu ihren mikroklimatischen Regulationsleistungen beschrieben (Kap. 2.2). Im Anschluss daran werden die Anforderungen an Straßenbäume im Klimawandel dargestellt, woraus das zunehmende Interesse an trockenheitstoleranten Gehölzen erklärt und damit verbundene Konsequenzen für die Kühlleistung hergeleitet werden (Kap. 2.3).

### **2.1 Funktionen von Stadtbäumen**

Weltweite Verstädterung und die Auswirkungen des Klimawandels haben das Bewusstsein für die Vorteile von natürlichen Ökosystemen geschärft (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Unter dem Begriff der Ökosystemleistungen werden diese in der Wissenschaft zusammengefasst und zunehmend untersucht. Die Erbringung von Ökosystemleistungen erfolgt über Pflanzen und leistet einen Beitrag zum Wohlbefinden der Menschen (Potschin & Haines-Young, 2016, S. 26). Häufig werden drei Arten von Ökosystemleistungen unterschieden: Versorgungsleistungen (z.B. Nahrung, Habitat), kulturelle Leistungen (z.B. Erholung, therapeutischer Wert) und regulierende Leistungen (z.B. Reinigung von Wasser und Luft).

Stadtbäume dienen den Menschen auf vielfältige Weise: sie nehmen im Rahmen ihrer Photosynthese Kohlenstoff auf und speichern diesen (Davies et al., 2011; Nowak et al., 2013). Baumkronen können geeignete Habitate für urbane Insekten (Böll et al., 2019) und eine Futterquelle für Bestäuberpopulationen darstellen. Außerdem erhöht ein diverser Baumbestand die Widerstandsfähigkeit gegenüber Veränderungen im Rahmen des globalen Wandels, wie beispielweise dem vermehrten Auftreten neuer Schaderreger in Bayern (StMUV, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2015).

Grünflächen und Einzelpflanzen steigern die Attraktivität und Aufenthaltsqualität von Wohn- und anderen Stadtgebieten mit positiven Folgeeffekten auf den Wert von Immobilien, die Reduzierung von Leerständen und die Besucherzahlen. Somit ist die Etablierung von Stadtgrün mancherorts zu einer bedeutenden Maßnahme gegen die Abwanderung der Bevölkerung in attraktivere und ökonomisch stärkere Gebiete geworden. Vor allem Stadtwälder und -parks sind wichtige Orte für Erholung,

Sportausübung, das Spielen von Kindern und den Tourismus. Ihr Besuch fördert ganz allgemein einen aktiven, körperlich, geistig und psychisch gesunden Lebensstil und das Wohlbefinden (Chiesura, 2004; Gunnarsson & Öhrström, 2007; Laforzezza et al., 2009). Sie sind zugänglich für alle Altersklassen, unabhängig von Geschlecht und Einkommen.

Zu den Regulationsleistungen zählen der Beitrag zur Luft- und Sickerwasserreinigung inklusive der Feinstaubbindung aus Transport und der Verbrennung fossiler Brennstoffe (Nowak et al., 2006; Jim & Chen, 2008), die Lärminderung (Gunnarsson & Öhrström, 2007), das Abfangen von Niederschlag und die Minderungen des Oberflächenabflusses (Armson et al., 2013b; Zölch et al., 2017). Dadurch kommt urbaner Vegetation eine wichtige Rolle beim Hochwasserschutz zu (Zölch et al., 2017). Wurzelsysteme helfen dabei, die Bodenqualität und den Bodenwasserhaushalt zu verbessern, was seine Infiltrationskapazität erhöht (Rahman et al., 2019) und zur Grundwasserneubildung und -speicherung beiträgt.

Als urbane grüne Infrastruktur wird ein strategisch geplantes Netzwerk urbaner Natur verstanden, das mit Blick auf die Bereitstellung eines breiten Spektrums an Ökosystemleistungen angelegt ist (Pauleit et al., 2017). Studien haben gezeigt, dass Bäume bezüglich mancher Ökosystemleistungen im Vergleich zu anderen Vegetationsformen deutlich höhere Leistungen erbringen. So schätzten Davies et al. (2011) für die britische Stadt Leicester, dass innerhalb der urbanen grünen Infrastruktur oberirdisch 97,3 % des Kohlenstoffs in Bäumen gespeichert sind, während die übrigen 0,7 % krautiger und anderer verholzter Vegetation zuzuordnen sind. Modellrechnungen zeigten auch, dass die Bepflanzung mit Bäumen im Vergleich zur Fassaden- und Dachbegrünung eine größere Hitzeregulation beziehungsweise den bedeutendsten Beitrag zum thermischen Komfort in Städten bewirkt (Zölch et al., 2016). Das liegt in beiden Fällen daran, dass die Leistungspotenziale stark an die Biomasse der jeweiligen grünen Infrastruktur gekoppelt sind (Armson et al., 2012; Gillner et al., 2015b; Jiao et al., 2017). Somit bilden Einzelbäume, Straßenbaumreihen, Baumgruppen und Stadtwälder in vielerlei Hinsicht einen sehr bedeutenden Teil urbaner grüner Infrastruktur und wurden deshalb auch als Untersuchungsgegenstand dieser Dissertation ausgewählt. Angesichts der immer stärker werdenden baulichen Nachverdichtung und Flächenknappheit in vielen Städten (Bundesinstitut für Bau-,

Stadt- und Raumforschung, 2016) und dem damit einhergehenden Mangel an grünen Naherholungsflächen, bieten aber auch begrünte Dächer und Fassaden mit einem Minimum an Flächenanspruch eine Lösung für die künftigen Herausforderungen im urbanen Raum (Pfoser et al., 2014).

## **2.2 Mikroklimatische Regulationsleistungen**

### 2.2.1 Kühleffekte durch Stadtbäume

Neben vielen weiteren Vorteilen, erfahren auch die mikroklimatischen Regulationsleistungen von Stadtbäumen zunehmende Aufmerksamkeit (Zölch et al., 2016). Bäume regulieren durch Verschattung, Transpiration als auch durch die Beeinflussung der Durchlüftung das urbane Mikroklima und leisten somit einen Beitrag zur Klimaanpassung. Der Vorteil liegt insbesondere darin, dass sie der Überhitzung von Städten entgegenwirken (Armson et al., 2012; Gillner et al., 2015b; Moser et al., 2015; Zölch et al., 2016; Jiao et al., 2017; Rahman et al., 2017b). So fanden beispielsweise Jiao et al. (2017) bei einer Studie in Peking heraus, dass die Temperaturen in innerstädtischen Waldflächen um 0,7-5,7 °C kühler waren und eine um 1,3-15,8 % höhere relative Luftfeuchte aufwiesen im Vergleich zum umliegenden Stadtgebiet. Neben der regulierenden Biomasse beeinflussen die baulichen Eigenschaften des jeweiligen Stadtgebietes die Höhe dieses Effekts. Über das Informationsportal **KlimaAnpassung in Städten** (INKAS; Buchholz et al., 2016) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) kann mittels einer Wirkungsanalyse der Einfluss von Park- und Wasserflächen auf das städtische Mikroklima berechnet werden. Je nach Stadtgröße, Bebauungstyp, -umgebung und Größe der Parkanlage fallen die berechneten Temperaturdifferenzen zwischen einer Parkfläche und dem Referenzlauf ohne Park- und Wasserfläche unterschiedlich aus. Die Modelsergebnisse zeigen beispielsweise bei einer Parkfläche von 144 ha und einer dichten und hochversiegelten Citybebauung mit einer mittleren Gebäudehöhe von 19 m als Referenz einen maximalen Temperaturunterschied von 3,25 Kelvin. Bei Ein- und Mehrfamilienhaussiedlungen mit deutlich geringeren Geschosshöhen, Versiegelungsgraden und Gebäudeanteilen beträgt die maximale Differenz hingegen nur 1,57 Kelvin.

Besonders bedürftige Personen, wie ältere Menschen, Menschen mit Vorerkrankungen oder Kinder, können von der Senkung sommerlichen Hitzestresses profitieren und vor

den Auswirkungen unerwarteter und ungünstiger Wetterereignisse geschützt werden. Allerdings können in der Nacht dichte Baumkronen auch eine Hitzeakkumulation im städtischen Bereich verursachen, da durch ihre Schirmwirkung die Wärmeabstrahlung in die Höhe behindert wird (Gillner et al., 2015b; Rahman et al., 2017b).

Befinden sich Bäume in unmittelbarer Nähe zu Gebäuden, üben diese außerdem einen positiven Effekt auf das Innenraumklima aus (Zölch et al., 2016), indem sie in den warmen Monaten die Gebäude vor Überhitzung schützen. Gleichzeitig werden damit einem erhöhten Strombedarf, zum Beispiel für den Einsatz von Kühlsystemen und Klimaanlage, entgegengewirkt und Kosten gespart (Skelhorn et al., 2016). Sinnvoll erscheint dies vor allem unter der Vergegenwärtigung, dass Gebäude laut Weltklimarat zu jeweils rund einem Drittel am globalen Endenergieverbrauch und an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen beteiligt sind (Lucon et al., 2014); was den weltweiten Stromverbrauch betrifft sind es sogar 50 %. Allerdings sind die durch Bäume (und weitere Begrünungsformen) verursachten Energieeinsparungen nicht sehr hoch und nicht als Ersatz für erforderliche Maßnahmen im Bereich der klimafreundlichen Optimierung von Gebäudehüllen und Haustechnik zu sehen.

Die dem Kühleffekt maßgeblich zugrunde liegenden zwei Mechanismen sind die Verschattung und die Kühlung durch Transpiration (Shashua-Bar & Hoffman, 2000; Jiao et al., 2017). Welchen Anteil der jeweilige Mechanismus für den Kühleffekt hat, ist stark von den jeweiligen Standortbedingungen abhängig (Rahman et al., 2018). Shashua-Bar & Hoffmann (2000) berechneten in ihrer Studie in Tel-Aviv einen mittleren Anteil von 80 % der Verschattung am Kühleffekt um 15:00 Uhr nachmittags im Sommer. Alle Parameter, welche die Eigenschaften von Pflanzen, ihre Standortbedingungen (z.B. Bodenwasserhaushalt) und ihre Anordnung betreffen (von den Autoren ohne nähere Spezifikation als *site specific effect* zusammengefasst), machten hingegen nur 18 % des gesamten Kühleffekts aus. Jiao et al. (2017) zufolge ergeben sich ideale Kühlleistungen in räumlichen Anordnungen der Vegetation, wo Verschattung und Kühlung durch Transpiration gemeinsam ihr Maximum erreichen.

### 2.2.2 Verschattung

Dichte Baumkronen können einen hohen Anteil der eintreffenden Solarstrahlung absorbieren. Nach Brown & Gillespie (1995, S. 47) werden circa 80 % der sichtbaren kurzwelligeren Strahlung für das Wachstum und die biologischen Funktionen der Pflanzen genutzt und nur ein kleinerer Anteil wird reflektiert oder transmittiert (jeweils circa 10 %). Allerdings variieren diese Zahlen mit den Blatteigenschaften. So ermittelten Rahman et al. (in Vorbereitung) an heißen Sommertagen in Würzburg eine signifikant höhere Transmission der kurzwelligeren Strahlung bei der Gewöhnlichen Robinie mit ihren hellgrünen Fiederblättern im Vergleich zur Winter-Linde mit dickeren, dunkleren Blättern. Durch die Verschattung können Temperaturen asphaltierter Oberflächen um bis zu 19 °C reduziert werden (Armson et al., 2012; 2013a; Gillner et al., 2015b; Rahman et al., 2019). Somit wird vor allem in dicht bebauten Stadtteilen die nächtliche Wärmeabstrahlung der Bausubstanz reduziert und der städtischen Wärmeinsel entgegengewirkt. Die Verschattung führt zu geringeren Luft- und Strahlungstemperaturen und erhöht damit den thermischen Komfort an heißen Sommertagen (Armson et al., 2012; 2013a). Ein weiterer Vorteil ist die Reduzierung der haut- und augenschädigenden Ultraviolettstrahlung.

Der Verschattungseffekt ist am stärksten an unbewölkten, niederschlagsfreien Tagen und positiv korreliert mit der solaren Einstrahlung (Shashua-Bar & Hoffman, 2000), wobei die verschattete Fläche mit sinkendem Sonnenwinkel zunimmt (Jiao et al., 2017). Die Höhe des Verschattungseffekts ist jedoch auch in höchstem Maße abhängig von der Wuchshöhe und den Kronendimensionen (Gómez-Muñoz et al., 2010; Jiao et al., 2017) sowie der Höhe der verschattenden Blattoberfläche (Armson et al., 2013a; Gillner et al., 2015b; Rahman et al., 2019; 2020). Gillner et al. (2015b) fanden beispielsweise durch Messungen an Stadtbäumen in Dresden heraus, dass jede Zunahme der Blattflächendichte ( $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ) um den Faktor 1 zu einer Temperaturreduktion beschatteter asphaltierter Oberflächen von 4,63 °C an heißen Sommertagen führte. Häufiger noch wird die Beziehung zwischen Verschattung und dem sogenannten Blattflächenindex (engl. *leaf area index*, LAI) untersucht (Moser et al., 2015), der die einseitige Blattfläche pro Quadratmeter Bodenoberfläche ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) angibt. Es ist substantiell erforscht, dass dieser signifikant die Verschattung beeinflusst (Rahman et al., 2020). Da die Höhe der Belaubung je nach Baumart oder Sorte variieren kann (Peters et al., 2010; Armson et al., 2013a; Gillner et al., 2015b; Rahman et al., 2015; Stratópoulos et al., 2018; 2019a) und

Kronendimensionen durch Pflegemaßnahmen beeinflussbar sind, kann der Mensch durch gärtnerische Maßnahmen und eine geeignete Gehölzwahl die Verschattungsleistung beeinflussen (Shashua-Bar & Hoffman, 2000). Darüber hinaus sind das Rückstrahlvermögen (Albedo) der Biomasse und ihre räumliche Ausrichtung zur Sonneneinstrahlung Einflussfaktoren (Brown & Gillespie, 1995, S. 50).

### 2.2.3 Kühlung durch Transpiration

Neben der Verschattung hat auch die Transpiration der Bäume einen positiven Einfluss auf das städtische Mikroklima (Gillner et al., 2015b; Rahman et al., 2017b). Der häufig in diesem Zusammenhang verwendete Begriff der Transpirationskühlung ist allerdings missverständlich. Kühlung entsteht nämlich nicht durch das transpierte Wasser an sich, sondern dadurch, dass für die Transpiration (Phasenübergang von flüssigem Wasser zu Wasserdampf) ein Teil der eintreffenden Solarenergie genutzt, in latente Wärme umgewandelt und an die Umgebung als solche abgegeben wird, was zu keiner weiteren Erhöhung der Lufttemperatur führt. Vegetation „kühlt“ also nicht, sondern sorgt dafür, dass sich die Umgebungsluft „weniger stark erwärmt“ (Kurn et al., 1994, S. 5). Neben einer Erhöhung der absoluten Luftfeuchtigkeit durch den freigesetzten Wasserdampf kommt es infolge der Temperaturreduktion zu einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte (Jiao et al., 2017) beziehungsweise einer Verringerung des Sättigungsdefizites der Luft (engl. *vapor pressure deficit*, VPD; hPa) (Shashua-Bar & Hoffman, 2000). Positiv beeinflusst werden das Mikroklima innerhalb und unterhalb des Kronenraumes (Rahman et al., 2017b; 2018), wobei es zu einer vertikalen Abnahme des Kühleffekts in Richtung Boden (Rahman et al., 2018) als auch in der Peripherie der Krone durch horizontalen Transport der abgekühlten und feuchten Luftpakete (Shashua-Bar & Hoffman, 2000) kommt.

Durch Multiplikation der Transpiration mit dem Energiebedarf, der für die Verdunstung von Wasser benötigt wird ( $2,45 \text{ kJ g}^{-1}$ ), kann der Energieverlust und damit der tatsächliche Kühleffekt quantifiziert werden (Rahman et al., 2017b). So ermittelten Rahman et al. (2017b) beispielsweise bis zu  $3,5 \text{ °C}$  Temperaturreduktion in den Kronenradien ausgewachsener Winter-Linden in München, was einem Energieverlust von etwa  $75 \text{ W m}^{-2}$  entspricht.

Wie bei der Verschattung ist die Transpiration beziehungsweise der daraus resultierende Kühleffekt maßgeblich abhängig von der Blattbiomasse (Lösch, 2011, S. 398; Peters et al., 2010; Rahman et al., 2018; Stratópoulos et al., 2018) und der Größe der Bäume (Pataki et al., 2011; Jiao et al., 2017). Außerdem bestehen starke Korrelationen mit der solaren Einstrahlung (Shashua-Bar & Hoffman, 2000; Peters et al., 2010; Rahman et al., 2017b; Stratópoulos et al., 2019b), der Windgeschwindigkeit (Rahman et al., 2017b), dem VPD der Luft (Peters et al., 2010; Pataki et al., 2011; Rahman et al., 2017b; Stratópoulos et al., 2018) und der Bodenwasserverfügbarkeit (Pataki et al., 2011; Rahman et al., 2017a; Stratópoulos et al., 2019b).

Große Unterschiede im Wasserverbrauch gibt es zwischen Baumarten (Pataki et al., 2011) und Pflanzenfunktionstypen, wie beispielsweise zwischen sommergrünen Laubbäumen und immergrünen Nadelbäumen (Peters et al., 2010). Bei Pataki et al. (2011) ergab sich bei Xylemflussmessungen an einer Vielzahl von Baumarten in Südkalifornien im August beispielsweise eine Wertespanne von  $176,9 \text{ l Tag}^{-1}$  für *Platanus hybrida* bis nur  $8,8 \text{ l Tag}^{-1}$  für *Jacaranda mimosifolia* (beide bewässert) und durchschnittlich nur  $3,2 \text{ l Tag}^{-1}$  für nicht bewässerte *Pinus canariensis*. Unterschiede, die weder durch Umweltbedingungen, die Variabilität in der Größe der Bäume noch durch die unterschiedliche Dicke des Xylems erklärt werden konnten, schrieben die Autoren der unterschiedlichen Herkunft der gemessenen Arten zu, welche aus tropischen bis gemäßigten Klimaten stammten. Ufergehölze und tropische Arten wiesen den höchsten Wasserverbrauch auf, während australische Gehölze, sowie *Sequoia sempervirens* und der an ein subtropisches Klima angepasste Palisanderholzbaum (*Jacaranda mimosifolia*) am wenigsten Wasser verbrauchten. Die dahinter stehenden Wirkungsmechanismen werden in Kapitel 2.3.3 behandelt.

Ein bedeutender Einflussfaktor für die Höhe des Wasserverbrauches ist auch die Holzanatomie. Eine ausgeprägte Dichotomie zwischen weitleumigen Gefäßen im Frühholz und engen Spätholzgefäßen ist bei ringporigen Baumarten (z.B. Robinien, Eichen) zu finden, während bei zerstreutporigen Bäumen (z.B. Linden, Ahorne) enge Leitgefäße im Früh- und Spätholz relativ gleichmäßig gebildet werden (Tyree & Zimmermann, 2002). Die weitleumigen Leitgefäße der Ringporer, welche während des üblicherweise niederschlagsreichen Frühjahrs gebildet werden, befinden sich nur in der äußeren Zone des Stammes. Da die Leitfähigkeit eines Gefäßes mit der vierten Potenz

seines Radius zunimmt (Lösch, 2001, S. 194), weisen diese eine deutlich effizientere Wasserleitung auf als die über den gesamten Stammquerschnitt verteilten Leitbahnen der Zerstreuporer (Uehre & Herrmann, 2017, S. 185f.). Ihre größeren Gefäßlumina machen Ringporer jedoch auch anfälliger gegenüber Kavitationen im Xylem (Tyree & Zimmermann, 2002, S. 21). Deshalb müssen sie ihren Wasserverbrauch stärker und konstanter über die Vegetationsperiode regulieren (Bush et al., 2008; Peters et al., 2010; Moser-Reischl et al., 2019). Dadurch weisen zerstreutporige Bäume bis zu dreimal höhere Transpirationsraten und somit auch Kühlleistungen auf als ringporige Bäume (Bush et al., 2008; Peters et al., 2010; Rahman et al., 2018; 2019; Moser-Reischl et al., 2019). Folglich ist ihre Wassernutzungseffizienz (engl. *water-use efficiency*, WUE) jedoch häufig auch niedriger (Gillner et al., 2015a; Moser-Reischl et al., 2019). Darüber hinaus treiben Ringporer später im Frühjahr aus, da die weitleumigen Leitgefäße über den Winter irreversibel beschädigt werden, sodass sie zuerst neues Xylem aufbauen müssen, bevor es zum Blattaustrieb kommen kann (Lechowicz, 1984). Bei ausgeprägter Frühjahrstrockenheit können sie somit nur eine verminderte Verschattung und Kühlung durch Transpiration erbringen.

## **2.3 Änderungen städtischer Wuchsbedingungen und angepasste Gehölzwahl**

### **2.3.1 Klimawandel und Standort als Doppelbelastung**

Eine Grundvoraussetzung, dass Stadtbäume ihre Kühlleistung erbringen können, ist, dass sie vital und gesund sind. Arten und Sorten, die in Städten traditionell viel gepflanzt werden, an ein gemäßigtes Klima angepasst sind und dadurch hohe Anforderungen an die Wasserversorgung aufweisen, zeigen im Zuge des Klimawandels jedoch erhebliche Hitze- und Trockenschäden (Roloff & Rust, 2007; Uehre & Herrmann, 2017). Vermehrt zu beobachten sind ein verfrühter Blattfall, hitzebedingte Stammschäden in Form von Rissen und Sonnen-Nekrosen bis hin zum Absterben von Trieben oder gar ganzen Bäumen. Entscheidende Stressfaktoren für die wenig an Trockenheit angepassten Baumarten und Sorten in Mitteleuropa sind die gegenwärtig und nach Klimawandelprognosen zukünftig verstärkt auftretenden trockenen und heißen Sommermonate in Kombination mit dem städtischen Wärmeinseleffekt (Roloff et al., 2013; StMUV, 2015).

In Bayern äußerte sich der Klimawandel bislang durch eine Erwärmung der bodennahen Lufttemperatur (2 m Höhe), einer Tendenz zur Zunahme und erhöhten Intensität von Starkregenereignissen, einer Zunahme frostfreier Tage und einem Rückgang der Tage mit Schneebedeckung (StMUV, 2015). Dieser Trend wird sich je nach zukünftiger gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Entwicklung beziehungsweise den CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen (IPCC, 2014) weiter fortsetzen oder verstärken. Für die Stadt München wird bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erwärmung der bodennahen Lufttemperatur von bis zu +3 °C projiziert (Abb. 2). Ein Trend zu mehr Sommertagen mit einem Maximum der Lufttemperatur von mindestens 25 °C ist ebenfalls zu verzeichnen und am Ende des Jahrhunderts werden jährlich bis zu 27 Hitzetage mit einer Maximaltemperatur von mindestens 30 °C erwartet (DWD, 2019b). Im Winter werden mehr Niederschläge fallen und die Temperaturen ebenfalls steigen (StMUV, 2015; DWD, 2019b).

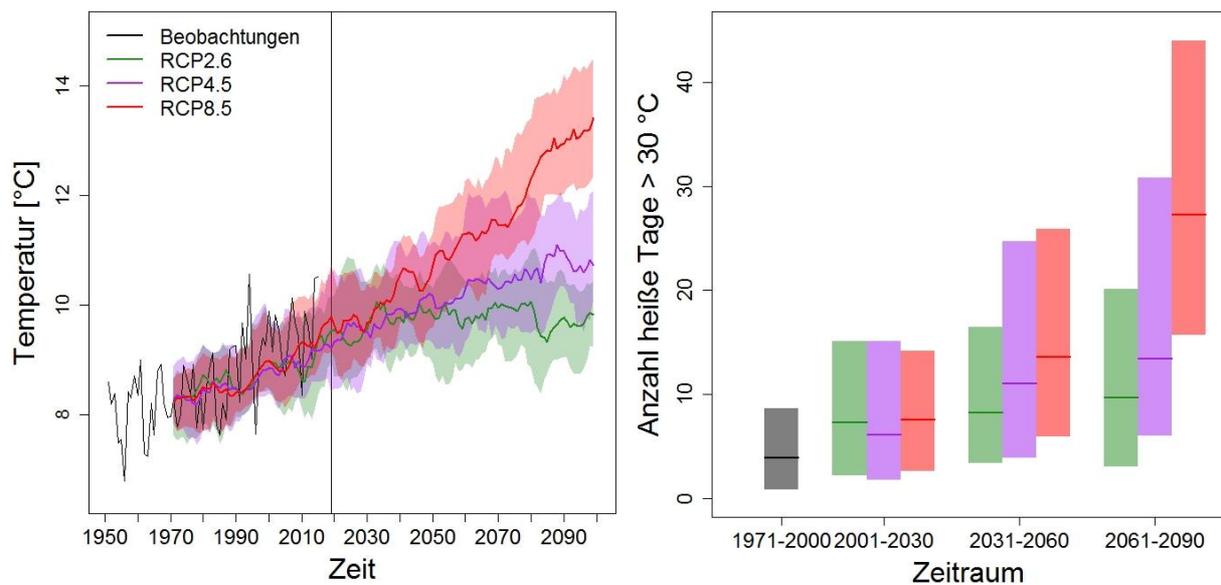


Abbildung 2. Änderung der Mitteltemperatur in 2 m Höhe und der Anzahl der heißen Tage mit einer Maximaltemperatur > 30 °C im Münchener Stadtgebiet bis 2099 nach den Emissionsszenarien RCP8.5 (sehr hohe Emissionen), RCP4.5 (mittlere Emissionen) und RCP2.6 (sehr niedrige Emissionen) des Intergovernmental Panel on Climate Change. Eigene Analysen und Darstellung basieren auf Daten eines DWD-Referenzensembles und wurden für Deutschland auf einem 5 km-Raster unter Verwendung des HYRAS Beobachtungsdatensatzes regionalisiert und biasadjustiert. Die Klimaänderungssignale werden zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Klimaprojektionsensembles dargestellt; die Ergebnisse des 50. Perzentils sind fett dargestellt.

Trocken- und Hitzestress-Symptome sind jedoch nicht an allen Stadtbäumen gleichermaßen vorzufinden. Studien haben gezeigt, dass die Vitalität und Leistungsfähigkeit von Stadtbäumen vor allem an Wuchsorten mit hohem Versiegelungsgrad, wie an Straßen, auf Plätzen und Parkplätzen oder in Fußgängerzonen eingeschränkt sind (Moser et al., 2017; Rahman et al., 2017a; 2020). Die jüngste dieser Studien – eine Metaanalyse über das Kühlpotenzial von Stadtbäumen (Rahman et al., 2020) – ermittelte eine im Durchschnitt zehnfach höhere Transpiration pro Quadratmeter Blattfläche für Bäume, die an naturnahen, unversiegelten Standorten in der Stadt wuchsen ( $4,15 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ) im Vergleich zu Bäumen versiegelter Standorte ( $0,44 \text{ g m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ). Besonders schwierig ist die Wuchssituation von Straßenbäumen, die häufig mit sehr geringen Infiltrationsraten und niedriger Bodenfeuchte (Rahman et al., 2017a) bei gleichzeitig hohem Sättigungsdefizit der Luft (George et al., 2007), hohem Oberflächenabfluss und hoher Bodenverdichtung, mit Streusalzeintrag und daraus folgender Verschlämmung, Baumaßnahmen und Vandalismus (Pauleit et al., 2002), hoher Einstrahlung und Gebäuderückstrahlung zu kämpfen haben (Roloff, 2013). Aus diesem Grund erreichen sie nur etwa 25 % ihrer potenziellen Altersspanne, bei Stadtbäumen allgemein sind es 50 % (Roloff, 2013). Vorzeitige Alterung und Mortalität werden außerdem verursacht durch den häufig begrenzten und gestörten Wurzelraum (Roloff, 2013). Diesbezüglich konnte in einer Studie über Stadtbäume in Verkehrsflächen (Reichwein, 2002) allerdings gezeigt werden, dass Bäume, die ihre Wurzeln vorwiegend in Richtung lockerer und durchlässiger Bodenareale entwickeln, auch eine sehr hohe Anpassungsfähigkeit an schwierige Wuchssituationen aufweisen. Infolgedessen können unter Verkehrsflächen häufig sehr untypische Wurzelformationen vorgefunden werden. Darüber hinaus lassen sorgfältig entwickelte Substrate und neue Pflanztechniken ein gutes Gedeihen von Straßenbäumen auch an den schwierigsten Standorten zu. Die hohe Bedeutung der Schaffung geeigneter Bodenverhältnisse findet auch Ausdruck in entsprechenden Regelwerken für Baumpflanzungen (z.B. FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, 2010). Neben den Pflanzgruben, der Wurzelraumerweiterung sowie den hierzu erforderlichen Bauweisen und Substraten gewinnt auch das Thema der Düngung zunehmend an Bedeutung.

Bislang gibt es allerdings nur sehr wenige wissenschaftliche Studien, die sich mit dem Thema der unterirdischen Pflanzenbiomasse von Stadtbäumen intensiv beschäftigt haben (Čermák et al., 2000; Reichwein, 2002; Taeger, 2017; Zhang et al., 2019; 2020)

oder zumindest Wurzeluntersuchungen mit einschlossen (Rahman et al., 2019). Wie sich die Wurzelarchitektur beziehungsweise die Kohlenstoffpartitionierung von Arten und Sorten unter starker Trockenheit verändert, wurde im urbanen Kontext bislang gar nicht untersucht.

### 2.3.2 Klimagerechte Gehölzwahl

Aufgrund des Klimawandels und der sich durch zunehmende Nachverdichtung und Flächenversiegelung verschlechternden Wuchsbedingungen müssen insbesondere für hochversiegelte Standorte mit wenig Wurzelraum widerstandsfähige Arten und Sorten gefunden werden. Da Phasen ausgeprägter Frühjahrs- und Sommertrockenheit bereits häufig auftreten und in Zukunft noch wahrscheinlicher werden, muss ihre Fähigkeit insbesondere darin liegen, mit ausgedehnten Trockenphasen und Hitzestress zurechtzukommen. Für Roloff et al. (2013) gilt dabei der Trockenstress als die wichtigste Herausforderung für Stadtbaumarten in den nächsten Jahren bis Jahrzehnten. Daher wird die Baumartenwahl aktuell kritisch überdacht und teilweise ein Wechsel hin zu trockenheitstoleranten Arten und Sorten angestrebt (Hiemstra, 2011; Roloff & Gillner, 2013; GALK, Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz, 2019; LWG, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, 2019). Eine geringere Anfälligkeit gegenüber Schädlingen oder weiteren abiotischen Stressfaktoren ist – wie auch beim klimagerechten Waldumbau – eine zusätzliche Motivation, die inter- und intraspezifische Variabilität im innerstädtischen Pflanzenbestand zu erhöhen.

Es existieren unterschiedliche Ansätze, um die Zukunftseignung von Straßenbaumarten und -sorten zu bewerten. Bereits seit Jahrzehnten erfolgt im GALK Straßenbaumtest in verschiedenen Städten des deutschsprachigen mitteleuropäischen Raumes ein Langzeit-Monitoring. Einzelbewertungen werden in einem Gesamtergebnis zusammengefasst und mit Verwendungshinweisen in der „GALK Straßenbaumliste“ (GALK, 2019) veröffentlicht. Ebenfalls sehr umfassend war der holländische Straßenbaumtest (Hiemstra, 2011), bei dem jedoch fast ausschließlich Sorten getestet wurden. Das niederländische Pendant zur GALK Straßenbaumliste wurde 2011 abgeschlossen und die Ergebnisse mit den Erfahrungen in Deutschland abgeglichen. Im Projekt „Stadtgrün 2021“ der LWG in Veitshöchheim werden seit 2010 zukunftssträchtige

Arten und Sorten aus dem (süd-)osteuropäischen, nordamerikanischen und asiatischen Raum erprobt. Der Langzeitversuch findet in den drei klimatisch sehr unterschiedlichen Standorten Würzburg (Weinbauklima), Hof/Münchberg (hohe Frostgefährdung) und Kempten (hohe Niederschläge) statt. Das Sortiment umfasst mittlerweile 30 Versuchsbaumarten und Sorten (Böll, 2017).

Darüber hinaus gibt es Versuche, die sich vor allem mit den Fragen der richtigen Anzucht von künftigen Stadtbäumen beschäftigen. In dem Teilprojekt 9 „Anpassung gärtnerischer Kulturen an den Klimawandel“ des Innovationsnetzwerks Klimaanpassung Berlin-Brandenburg (INKA BB, 2019) testeten Wissenschaftler der Humboldt-Universität zu Berlin in einem Baumschulversuch insgesamt 83 Allee- und Obstgehölzen hinsichtlich ihrer Anpassungsfähigkeit an erwartete Klimaveränderungen. Das Projekt (Laufzeit 2009-2014) umfasste unter anderem Versuche mit drei unterschiedlichen Bewässerungsvarianten um herauszufinden, ob Gehölze bereits in den Baumschulen so konditioniert werden können, dass sie optimal auf die Bedingungen am Endstandort vorbereitet sind. Ob eine frühzeitige Anpassung an Trockenheit in den ersten Lebensjahren die Trockenheitstoleranz von Gehölzen erhöhen kann, wurde außerdem in dem Projekt *AdapTree* in einem mehrjährigen Freilandversuch mit fünf Arten und Sorten untersucht. Eine Erkenntnis war, dass vor der Frage nach dem richtigen Bewässerungsregime zunächst die Entscheidung stehen müsse, ob Bäume in der Baumschule möglichst schnell eine bestimmte Größe erreichen sollten oder zugunsten einer besseren Angepasstheit eine längere Kultivierungsphase in Kauf genommen werden könne (Dreßler et al., 2017).

Versuche zum Wasserverbrauch, der Hitze- und Trockenheitstoleranz wurden bei den Münster-Wolbecker Sortimentsversuchen (2008-2011, 2012, 2015/2016) für Alleebäume durchgeführt (Uehre & Herrmann, 2017). Ein Untersuchungsziel war es, die Anfälligkeit von unterschiedlichen Arten und Sorten gegenüber hitzebedingten Stammschäden zu ermitteln. Dabei stellte sich heraus, dass diese – abgesehen von den Standortbedingungen – stark von der Holz Anatomie, dem Wasserverbrauch und der Rindenbeschaffenheit eines Baumes abhängt. Darüber hinaus zeigte sich, dass hitzetolerante Baumarten nicht notwendigerweise auch trockenheitstolerant sind.

Parallel zu den praktischen Tests werden theoretische Einschätzungen über die Eignung von Stadtbaumarten und -sorten auf Basis des Wissens über die Umweltbedingungen

in deren jeweiligem Ursprungshabitat getroffen (Duhme & Pauleit, 2000; McCarthy et al., 2011; Sjöman et al., 2012; Roloff & Gillner, 2013). Eine Idee, die dahinter steht, ist, dass Arten, die durch ihre natürliche Verbreitung an Trockenheit angepasst sind, in versiegelten städtischen Wuchsorten gut gedeihen, da sie dort gewissermaßen ähnliche Bedingungen vorfinden. Geleitet von dieser Idee machten sich Sjöman et al. (2012) in Zentralchina, im Nordosten Rumäniens und in Moldawien auf die Suche nach geeigneten Zukunftsbäumen für die Stadt und stellten dabei fest, dass das Spektrum geeigneter Arten, welches in der Natur vorzufinden ist, bislang kaum genutzt werde. Bei der Klimaartenmatrix für Stadtbaumarten (KLAM-Stadt) (Roloff & Gillner, 2013) wird auf Grundlage von belastbaren Publikationen die Verwendbarkeit von über 250 mitteleuropäischen Stadtbaumarten im Klimawandel hergeleitet. Eine Beurteilung ihrer Trockenheitstoleranz erfolgt dabei hauptsächlich auf Basis ihres heutigen Vorkommens in den unterschiedlichen Lebensbereichen nach Kiermeier (1992) (Abb. 3). Gehölze, die vorwiegend in Heiden- und Dünengehölzen (Lebensbereich (LB) 5) und Steppengehölzen und Trockenwäldern (LB 6) vorkommen, werden bezüglich der Trockenheitstoleranz als eher im Vorteil eingestuft. Moor- und Sumpfgehölze (LB 1), Auen- und Ufergehölze (LB 2) und Gehölze kühlfeuchter Wälder (LB 7) gelten als eher im Nachteil und Gehölze artenreicher (LB 3) und artenarmer (LB 4) Wälder und Gehölzgruppen, Bergwälder und alpine Sträucher (LB 8) und Hecken- und Strauchfluren (LB 9) als indifferent. Neben der Trockentoleranz ist bei KLAM-Stadt außerdem die Winterhärte von Gehölzen ein gleichberechtigtes Eignungskriterium. Dies ist trotz des Klimawandels nachvollziehbar, weil weiterhin mit Spätfrösten gerechnet werden muss, deren Gefahr durch den früheren Vegetationsbeginn in Zukunft vermutlich noch zunehmen wird (StMUV, 2015). Die meisten Gehölze der KLAM-Stadt stammen aus den Lebensbereichen 3 und 6, wie auch die Versuchsbaumarten und -sorten beim Projekt Stadtgrün 2021. Die Gehölze aus dem trockeneren Lebensbereich 6 werden dabei häufig auch als „Klimabäume“ betitelt und als Alternative für die heimischen Waldbaumarten betrachtet. Dieser Begriff wird mittlerweile im Baumschulmarketing und dem Versuchswesen häufig verwendet, auch wenn er einer wissenschaftlichen Definition entbehrt.

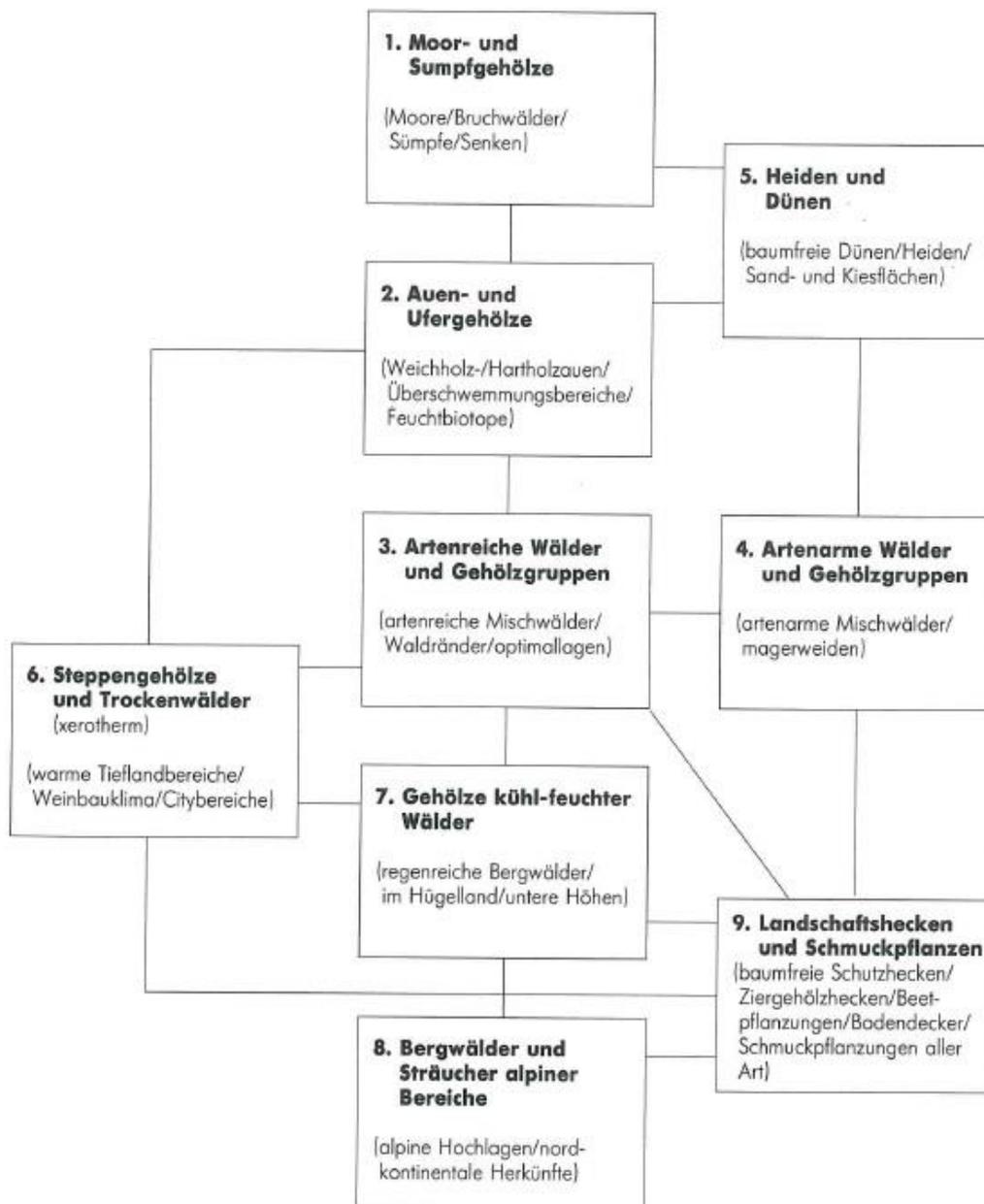


Abbildung 3. Übersicht der Lebensbereiche aus Kiermeier (1992, S. 6)

### *Trockenstressexperimente im Rahmen der Stadtbaumforschung*

Welche Arten und Provenienzen besonders sensitiv auf künftige Klimaänderungen reagieren, wird intensiv im Bereich der Forstwissenschaft anhand von Trockenstressexperimenten untersucht. Häufig handelt es sich um Topfexperimente unter kontrollierten Gewächshausbedingungen (Kunz et al., 2016; Seidel & Menzel, 2016; Seidel et al., 2019), seltener wurde versucht, Trockenstress an ausgewachsenen Bäumen im Freiland zu induzieren (Rötzer et al., 2017). Die Ergebnisse aus den Forstwissenschaften sind jedoch nicht direkt auf den Stadtraum übertragbar, da sie in

Waldbeständen durchgeführt wurden. Bei Kölling (2007), der mit seinen „Klimahüllen“ ein zentrales Instrument zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Verbreitung von Baumarten jenseits der Städte geschaffen hat, wurden die künftigen Klimawerte beispielsweise unter Annahme des Emissionsszenarios B1 modelliert, bei dem eine nur mäßige Temperaturerhöhung von durchschnittlich 1,8 °C bis zum Jahr 2100 prognostiziert wird. Durch den Wärmeinseleffekt sind diese Bedingungen in Städten jedoch teilweise schon heute vorzufinden (George et al., 2007). Pretzsch et al. (2017) fanden in einer groß angelegten Studie an Stadtbäumen in zehn Metropolen weltweit heraus, dass ihr Wachstum seit den 1960er Jahren zugenommen hat und diese schneller gewachsen sind als Bäume im ländlichen Umland. Bislang scheinen trotz der zum Teil widrigen Wuchsbedingungen in der Stadt die im Vergleich zum Umland höheren Temperaturen, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (George et al., 2007) und Stickstoffdepositionen (Bettez & Groffmann, 2013), das höhere Sättigungsdefizit der Luft (VPD) (George et al., 2007) und die geringeren Ozon-Konzentrationen (Gregg et al., 2003) das Baumwachstum positiv zu beeinflussen. Allerdings könnte sich dieser positive Effekt auch umkehren, wenn es in Zukunft zu trocken wird.

In der Stadtbaumforschung gibt es bislang nur wenige Studien, die sich zum Ziel gesetzt haben, explizit das Verhalten von Bäumen unter Trockenheit zu untersuchen (Gillner et al., 2015a; Fini et al., 2009; Moser et al., 2017; Rahman et al., 2017a; 2018). Häufig wurden Messergebnisse von Tagen mit hohem VPD und somit hoher atmosphärischer Trockenheit ausgewertet, wodurch hohe Blattwasserverluste auftreten können. Eine systematische Austrocknung des Bodens fand jedoch nicht statt. Bei Gillner et al. (2015a) wurde beispielsweise der Gaswechsel von unterschiedlichen Straßenbaumarten bei hohem VPD untersucht. Bei dem Straßenabschnitt, an dem die Spitz-Ahorne gemessen wurden, betrugen die Bodenwassergehalte in 60 cm Bodentiefe jedoch nie weniger als 25 Vol.-%. In trockenen Sommern können Böden in den obersten Lagen jedoch Wassergehalte von unter 10 % aufweisen (Kap. 4.1.2), insbesondere in Gebieten mit geringer Grundwasserneubildungsrate und sandigen Böden im (Nord-)Osten Deutschlands (Helmholtz Zentrum für Umweltforschung, 2019).

Auch Bush et al. (2008) untersuchten das stomatäre Verhalten des Spitz-Ahorns (und weiteren Arten) unter starker atmosphärischer Trockenheit. Da die Studie in einem semiariden Stadtklima durchgeführt wurde, boten sich ideale Bedingungen für den Versuch, die Bäume wurden jedoch permanent bewässert. Der Versuch von Fini et al.

(2009) in der Nähe der italienischen Stadt Como beinhaltete ebenfalls Gaswechseluntersuchungen von drei Spitz-Ahornsorten bei hohem VPD. Bei diesem Experiment wurde die Behandlungsvariante *water shortage* jedoch lediglich über das Unterlassen von Bewässerungsmaßnahmen definiert und das bei mittleren Jahresniederschlägen von 1086 mm. Trotz eines Hinweises der Autoren auf üblicherweise trockene und heiße Bedingungen im Sommer (v.a. im Juli), ließ die Datengrundlage keine weiterführende Einschätzung der tatsächlichen Stressbelastung zu. Es muss klar unterscheidbar sein, ob es sich bei gemessenen Werten um ein Verhalten unter Trockenstress, unter stressfreien Bedingungen oder unter optimalen Ressourcenverfügbarkeiten handelt. Für den Spitz-Ahorn ist nur eine forstwissenschaftliche Studie (Kunz et al., 2016) bekannt, in der bei nachweislich starker Bodenaustrocknung das physiologische Verhalten von getopften Keimlingen untersucht wurde. Es ist ferner auch das einzige Experiment, bei dem die Pflanzen inklusive ihrer Wurzelsysteme analysiert wurden, obwohl diese Daten ein sehr hohes Erklärungspotenzial für das Verhalten von Arten und Sorten unter Trockenheit bieten (siehe folgendes Kapitel).

### 2.3.3 Anpassungen an Trockenheit

Die im vorherigen Kapitel aufgeführten Straßen-, Allee- und Stadtbaumtests und die theoretischen Ansätze folgen häufig der Annahme, dass verschiedene Existenzstrategien von Bäumen eng an die pflanzenökologisch relevanten Wuchsbedingungen in ihren jeweiligen Ursprungshabitaten gekoppelt sind. Bäume besitzen eine Reihe von strukturellen, morphologischen und physiologischen Anpassungsformen, um dem Stressor Wassermangel in ihrem natürlichen Lebensraum zu begegnen (Lösch, 2001, S. 398-405). Dabei können kurz-, mittel- und langfristige Anpassungen an Trockenheit unterschieden werden (Roloff et al., 2013). Während die strukturellen-morphologischen Anpassungen weitgehend bekannt und relativ einfach zu erfassen sind, gibt es bislang nur wenige Daten bezüglich der physiologischen Reaktionsmechanismen (Roloff et al., 2013).

### *Langfristige strukturelle und morphologische Anpassungen an Trockenheit*

Es ist bekannt, dass in Gebieten mit hoher Evapotranspirationsbelastung häufig Bäume mit einer geringen spezifischen Blattfläche ( $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$  Trockengewicht) und einer langen Blattlebensdauer vorkommen, während weichblättrige (malakophylle) Bäume mit einer hohen spezifischen Blattfläche vorwiegend in feuchten Habitaten anzutreffen sind (Roloff et al., 2013, S. 178; Pfadenhauer & Klötzli, 2014, S. 68f). Zwischen der sogenannten Sklerophyllie (Hartblättrigkeit) und der Malakophyllie gibt es ein Kontinuum mit Übergängen zwischen beiden Blattfunktionstypen (Pfadenhauer & Klötzli, 2014, S. 68). Typische Blattmerkmale von kleinblättrigen sklerophyllen Bäumen sind Sklerenchymfasern in den Leitbündelscheiben oder am Blattrand, eingesenkte Stomata, Wachsauflagen, verdickte Epidermis-Außenwände, verholzte Zellwände oder dichte Blattbehaarung (Larcher, 2001, S. 225f.; Lösch, 2001, S. 398-401; Roloff et al., 2013, S. 178). Diese Eigenschaften werden häufig bei Gehölzen aus dem Lebensbereich (LB) 6 Steppengehölze und Trockenwälder (Kiermeier, 1992) vorgefunden, wie beispielsweise dem Buchsbaum, der Silber-Linde und der Ungarischen Eiche. Sie führen allesamt zu einer verminderten Wasserabgabe. Kontrovers wird hingegen die Rolle der Fiederblättrigkeit bei Bäumen gesehen. Nach Pfadenhauer & Kötzli (2014, S. 68) sind stark gegliederte Blätter häufig eine Eigenschaft von malakophyllen Pflanzen feuchter Habitate. Tatsächlich handelt es sich bei vielen gefiederten Arten um Auen- und Ufergehölze (LB 2; Kiermeier, 1992). Beispiele sind die Sumpf-Eiche, die Gewöhnliche Esche oder auch die Amerikanische Gleditschie. Andere Autoren (z.B. Roloff et al., 2013, S. 178) erachten gefiederte und stark gelappte Blätter wiederum als langfristige Anpassung gegenüber Trockenheit, die es den Bäumen ermöglicht, bei starker Einstrahlung die Blattemperaturen und Verdunstungsraten stärker zu reduzieren als Bäume mit einfachen Blättern. Eine niedrigere Transpiration pro Quadratmeter Blattfläche für fieder- im Vergleich zu kompaktblättrigen Bäumen wurde auch in der Metaanalyse von Rahman et al. (2020) ermittelt. Allerdings weisen einige fiederblättrige Baumarten, wie beispielsweise die Gewöhnliche Robinie (LB 6) oder die Amerikanische Gleditschie (LB 2), auch eine ringporige Holzanatomie auf, was einen stärker regulierten Wasserverbrauch bedingt (Kap. 2.2.3). Die hohe Widerstandsfähigkeit, die aktuell bei diesen Arten im städtischen Raum beobachtet wird (GALK, 2019; LWG, 2019), macht in jedem Fall eine Einstufung von Fiederblättrigkeit als Indiz für Trockenheitstoleranz

plausibel. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass es sich um eine Scheinkorrelation handelt, die sich aufgrund der ringporigen Holzanatomie ergibt.

An Trockenheit angepasste Arten haben in der Regel eine höhere Holzdichte als schnellwachsende Arten, woraus eine geringere hydraulische Leitfähigkeit und Kohlenstoffassimilation resultieren (Santiago et al., 2004; Roloff et al., 2013, S. 178). Am Stamm können als Anpassung an Hitze und Trockenheit Epidermis und Rinde verdickt sein, wie beispielsweise bei der Baum-Hasel aus dem LB 3 artenreiche Wälder und Gehölzgruppen. Feld-Ulme (LB 3) und Feld-Ahorn (LB 6) weisen eine korkige Rinde auf (Roloff et al., 2013, S. 178). Beim Feld-Ahorn wachsen auch die Zweige häufig kantig und zeigen braune Korkleisten. Aufgrund der Vertreter aus LB 3 ist festzustellen, dass die langfristigen Anpassungen auf Stammbasis nicht auf trockene Lebensbereiche beschränkt sind, sondern auch bei Arten aus frischen Waldhabitaten auftreten.

Bäume können die Wasseraufnahme steigern, indem sie ihre Wurzeloberfläche in vertikale und/oder horizontale ausdehnen und die Dichte der (Fein-)Wurzeln erhöhen (Larcher, 2001, S. 209; Lösch, 2001, S. 396ff.). Langfristig gesehen stellt ein hohes Wurzel-Spross-Verhältnis eine Anpassung an trockene Standorte dar (Mokany et al., 2006; Roloff et al., 2013, S. 178), welche die Toleranz gegenüber Trockenheit erhöht (Lösch, 2001, S. 124ff.). Somit konnte ein stark negativer Zusammenhang zwischen der Wasserverfügbarkeit in einem Gebiet und dem Wurzel-Spross-Verhältnis des jeweils anzutreffenden Vegetationstypus beobachtet werden (Mokany et al., 2006). Auf kurze Sicht kann moderater Wassermangel jedoch auch zu einer Kohlenstoffallokation weg von der Nutzung für den Aufbau von (Wurzel-)Biomasse hin zur Speicherung und Bildung von Abwehrstoffen, wie beispielsweise Harz, führen. Ist die Trockenheit jedoch zu stark ausgeprägt kommt es zu einem kompletten Stillstand der Kohlenstoffallokation (McDowell et al., 2008). Neben der Wasserverfügbarkeit haben aber auch viele weitere Faktoren Einfluss auf das Wurzel-Spross-Verhältnis, wie die Nährstoffverfügbarkeit am Standort, Regenerationsstrategien und die Konkurrenz um das Licht (Mokany et al., 2006).

### *Mittelfristige Reaktionen und Anpassungen*

Bei vielen Laubbäumen ist die Bildung von Kurztrieben eine mittelfristige Reaktion auf Trockenheit im Vorjahr, um bei minimalem Aufwand weiterhin möglichst viel

Photosynthese betreiben zu können (Roloff et al., 2013, S. 177). Bei andauerndem Trockenstress kommt es zur Bildung von Kurztriebketten mit einer baumartenspezifisch sehr unterschiedlichen Lebensdauer. Ist auch diese Anpassungsreaktion nicht genug, kann es zum Abstreben von exponierten Organen, wie Zweigen und Kronenteilen sowie Fein- und Schwachwurzeln kommen. Das sogenannte „Eidechsen-Prinzip“ ist eine Strategie, um die Versorgung der verbleibenden Pflanzenteile gewährleisten zu können. Eine weitere mittelfristige Anpassung an Trockenheit ist eine erhöhte Stomatadichte, die häufig mit einer geringeren Größe der einzelnen Spaltöffnungen korreliert (Larcher, 2001, S. 264f.; Roloff et al., 2013, S. 177).

#### *Kurzfristige physiologische Anpassungen an Trockenheit*

Pflanzen sind in der Lage, durch Nutzung interner Wasserspeicher ihre Wasserverluste zeitweilig zu kompensieren (Lösch, 2001, S. 402ff.). Bei Trockenheit zeigen daher die Stammdurchmesser einen ausgeprägten Tagesgang mit einer signifikanten Abnahme zur Zeit hoher potentieller Evapotranspiration, wenn nach der Nutzung des im Kronenraum gespeicherten Wassers sukzessive stamminternes Wasser genutzt wird (Zweifel et al., 2000; 2001; Larcher, 2001, S. 228f.) und einem Wiederanschwellen der Durchmesser zur Nachtzeit. Der tägliche Beitrag dieses Wassers zur Transpiration beträgt 5-22 % (Steppe & Lemeur, 2004; Köcher et al., 2013). Stammkontraktionen sind dabei hauptsächlich auf ein Schrumpfen des elastischen Gewebes der Rinde (Kambium, Phloem und Rindenparenchym) zurückzuführen, während das Xylem kaum zu den Dickenschwankungen beiträgt. Bei Messungen an einer 40-jährigen Fichte gingen 86 % der täglichen Dickenschwankungen auf den Bast (Rindenparenchym) zurück und nur 14 % auf das Holz (Xylem) (Liu & Payer, 1995). Die Lignifizierung führt dazu, dass die verholzten Zellwände im Xylem sehr starr sind im Gegensatz zu den Rindenparenchymzellen. Deren Turgor kann im Tagesgang stark schwanken und ruft die diurnale Rhythmik im Stammdurchmesser hervor. Somit korrelieren die Änderungen der Stammdurchmesser mit der Änderung des Wassergehaltes in der Rinde (Zweifel et al., 2000; 2001).

Auch durch hydraulische und stomatäre Regulation können Bäume ihren Wasserverbrauch koordinieren. Kommt es infolge von Wassermangel zu sinkenden

Wasserpotenzialen in den Zellen der Blätter, bewirkt das Schließen der Stomata eine kurzfristige Abkoppelung der Transpiration vom Verlauf der Evaporation (Lösch, 2001, S. 401). Damit können der hydrostatische Druck im Xylem und die Hydratation der Gewebe aufrechterhalten und somit exzessiven Blattwasserverlusten und physiologischer Schädigung vorgebeugt werden. Dieser Prozess hat eine hohe Bedeutung für den Wasserhaushalt der Pflanze, da im Übergang zur nicht wasserdampfgesättigten Atmosphäre im Boden-Pflanze-Atmosphäre-Kontinuum eine sprunghafte Änderung des Wasserpotenzials zu stark negativen Werten stattfindet (Lösch, 2001, S. 110). Allerdings kann der Stomataschluss den Abfall des Druckes und der hydraulischen Kapazität im Xylem nicht vollständig aufhalten, vor allem dann nicht, wenn es zu einer langanhaltenden Trockenphase kommt. Werden die Bodenwasserreserven nicht wiederaufgefüllt und die kritischen Schwellenwerte des Wasserpotenzials ( $\Psi$ ) überschritten, verliert die Pflanze ihre Blätter oder stirbt im schlechtesten Fall sogar ab (Lösch, 2001, S. 388). Ein häufiger Grund dafür ist die Embolienbildung (Kavitation), welche infolge sinkender Wasserpotenziale durch Abreißen der Wassersäulen in den Leitungsbahnen der Blätter, des Xylems oder der Rhizosphäre entstehen kann. Nach Austrocknung von Pflanzenteilen und entsprechend starker Embolienbildung kann es allerdings durch Wasserzufuhr auch zum Wiederaustrieb kommen oder bei manchen Arten zur Wiederbefüllung der kavitierten Gefäße (Tyree et al., 1999).

Die stomatäre Regulation wie auch die Entwicklung der Stomata und ihre Dichte wird durch zahlreiche atmosphärische Parameter beeinflusst, wie zum Beispiel der Lichtintensität und  $\text{CO}_2$ -Konzentration, aber auch durch endogene hormonelle (Abscisinsäure) und elektrophysiologische Signale (Larcher, 2001, S. 230f.). Aufgrund der vorherrschenden Umweltbedingungen weisen Arten aus trockenen Habitaten häufig einen effizienten und sensitiven Schließmechanismus auf (Lösch, 2001, S. 401f.; Pfadenhauer & Klötzli, 2014, S. 68). Ferner können sie Wasser aus trockenen Böden aufnehmen (Pfadenhauer & Klötzli, 2014, S. 69) und besitzen gleichzeitig eine hohe Toleranz gegenüber niedrigen Wasserpotenzialen (Roloff et al., 2013, S. 176; Klein, 2014). Dies wird unter anderem ermöglicht durch ihre hohe Holzdicke (Santiago et al., 2004) und eine geringe Zellelastizität infolge der Hartblättrigkeit – zwei Eigenschaften, die im Zuge der langfristigen Anpassungen bereits genannt wurden. Das macht Bäume in ariden Erdgegenden nicht weniger anfällig gegenüber der bevorstehenden Zunahme

von Trockenperioden als Bäume in feuchteren Gebieten (Choat et al., 2012). Werden diese trockenheitsadaptierten Arten jedoch als Stadtbäume in feuchteren Erdgegenden genutzt, werden ihre kritischen Schwellenwerte des Wasserpotenzials seltener überschritten und sie sind weniger anfällig gegenüber Embolienbildung bei Trockenheit. Das Wasserpotenzial bei Turgorverlust ( $\Psi_{P0}$ ) oder der  $\Psi_{50}$ -Wert, der die Spannung in den Leitgefäßen angibt, bei der 50 % der ursprünglichen Leitfähigkeit verlorengegangen ist, werden als verlässliche Indikatoren für die Trockenheitstoleranz von Baumarten erachtet. Choat et al. (2012) wiesen mit Hilfe der  $\Psi_{50}$ -Werte von 226 Waldbaumarten an 81 Standorten weltweit nach, dass die Resistenz gegenüber Embolienbildung stark mit dem mittleren Jahresniederschlag eines Gebietes korreliert. Darüber hinaus stellte Klein (2014) deutliche Unterschiede gemessener Wasserpotenziale in Abhängigkeit von der Holzanatomie fest.  $\Psi_{P0}$ - beziehungsweise  $\Psi_{50}$ -Werte wurden bislang hauptsächlich in forstwissenschaftlichen Studien publiziert (z.B. Choat et al., 2012, ergänzendes Material; Klein, 2014), nehmen aber auch für die Einstufung der Trockenheitstoleranz von Stadtbäumen an Bedeutung zu (Sjöman et al., 2018).

Innerhalb eines Gebietes kann jedoch mit einem breiten Spektrum an Anpassungen gegenüber Wassermangel gerechnet werden (Roloff et al., 2013, S. 174). Dabei können zwei unterschiedliche Reaktionsmöglichkeiten auf Trockenstress unterschieden werden: die Vermeidung, bei der empfindliche Organe und cytoplasmatische Strukturen nicht beeinträchtigt werden, oder das Ertragen von Trockenstress, wenn empfindliche Organe und cytoplasmatische Strukturen den Wassermangel schadensfrei ertragen können (Lösch, 2001, S. 389; Choat et al., 2012). Bäume, die eher dazu neigen Trockenstress zu ertragen, nutzen durch das Offenhalten der Stomata die gesamte Bandbreite der Wasserpotenziale innerhalb ihres Toleranzspektrums. Dadurch kann in hohem Maße Kohlenstoff assimiliert werden, es entsteht allerdings auch eine hohe Gefahr der Embolienbildung (McDowell et al., 2008). Messungen an ausgewachsenen Straßenbäumen in München haben ergeben, dass die Winter-Linde ein klassischer Vertreter dieses Strategietyps ist, was bei langanhaltendem Trockenstress zu einem Einbruch der Wuchs- und Transpirationsleistung führte (Moser-Reischl et al., 2019). Gleichzeitig – wenn auch seltener – kommen in trockenen Gebieten Arten vor, welche eine relativ geringe Toleranz gegenüber niedrigen Wasserpotenzialen und

Embolienbildung aufweisen (McDowell et al., 2008; Choat et al., 2012). In diesem Fall ist der Zusammenhang zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und dem  $\Psi_{50}$ -Wert nicht gegeben (Choat et al., 2012). Diese Bäume vermeiden Trockenstress, indem sie durch starke stomatäre Regulation einen möglichst hohen Sicherheitsabstand zu kritischen Wasserpotenzialen wahren und sterben daher selten aufgrund exzessiver Embolienbildung. In Stadtbaumversuchen (Moser-Reischl et al., 2019) wurde die ringporige Robinie diesem Strategietyp zugeordnet. Vertreter dieser Gruppe laufen jedoch umso mehr Gefahr, aufgrund ihres wassersparenden Verhaltens buchstäblich zu „verhungern“, da sich durch den Stomataschluss die Kohlenstoffaufnahme so stark minimiert, dass die Pflanze den anhaltenden metabolischen Bedarf nach Kohlenstoff nicht decken kann (McDowell et al., 2008). Dementsprechend sind sie auch schneller auf die Nutzung der bereits vor dem Stomataschluss assimilierten Kohlenstoffreserven angewiesen als Pflanzen, welche ihren Gaswechsel auch bei Trockenheit aufrechterhalten. Durch Photoinhibition oder erhöhte Atmung infolge erhöhter Temperaturen während der Trockenheit kann dieser Prozess noch verstärkt werden (McDowell et al., 2008).

Darüber ist ein frühzeitiger Blattabwurf - wie auch das "Eidechsen-Prinzip" (siehe Absatz zu *mittelfristigen Reaktionen und Anpassungen*) - eine vorbeugende Maßnahme, wodurch die Transpirationsfläche verringert wird und somit Trockenstress vermieden werden kann (Munné-Bosch & Alegre, 2004; Roloff et al., 2013, S. 177). Wird nur ein Teil der Blätter abgeworfen, können die verbleibenden Blätter außerdem von den remobilisierten Nährstoffen aus den abgeworfenen Blätter profitieren (Munné-Bosch & Alegre, 2004). Eine weitere Vermeidungsstrategie für niedrige Wasserpotenziale ist die Nutzung interner Wasserspeicher, die hauptsächlich bei zerstreutporigen Laubbäumen und Nadelbäumen beobachtet wird (Roloff et al., 2013, S. 177).

Einzig in Bezug auf die stomatäre Regulation des Wasserstatus werden die gegensätzlichen Strategien des Vermeidens und des Ertragens von Trockenstress auch als isohydrisch und anisohydrisch bezeichnet. Diese Klassifizierung ist ein hilfreiches theoretisches Konstrukt, verschleiert allerdings die Tatsache, dass es in der Natur ein Kontinuum zwischen beiden Kategorien gibt (Klein, 2014).

Es wird angenommen, dass die Mechanismen der Mortalität unter Trockenheit – Kavitation oder das „Verhungern“ aufgrund von geringer Kohlenstoffassimilation – von der Intensität und der Dauer des Trockenstress abhängen (McDowell et al., 2008). Wie intensiv eine Dürre tatsächlich ausfallen muss, um zum Absterben von Bäumen zu führen, ist noch weitgehend unerforscht und hängt von zahlreichen Faktoren ab. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass durch die Zunahme der Trockenphasen in Zukunft isohydrische Baumarten stärker leiden beziehungsweise absterben werden, denn sie zeigen diesbezüglich eine höhere Anfälligkeit und sind unter Trockenstress zusätzlich stark anfällig gegenüber Schädlingsbefall (McDowell et al., 2008). Besonders langanhaltende Trockenheit mittlerer Intensität kann aufgrund des sehr stark eingeschränkten Gaswechsels bei isohydrischen Baumarten zum Tod führen (McDowell et al., 2008). Bei anisohydrischen Arten geht man davon aus, dass sie unter diesen Umständen gut bestehen können, da sie mehr beziehungsweise länger Kohlenstoff assimilieren. Handelt es sich allerdings um eine Trockenphase ausreichender Dauer und Intensität, können sie an die kritischen Grenzen ihrer Wasserpotenziale gelangen und in Folge der Embolienbildungen absterben (McDowell et al., 2008). Im Sinne dieser Logik kann die Zugehörigkeit einer Baumart zu der einen oder anderen Strategie stomatärer Regulation über Leben und Tod in Trockenphasen entscheiden (McDowell et al., 2008). Nach Kunz et al. (2016) könnte der komplementäre Ressourcenverbrauch isohydrischer und anisohydrischer Arten jedoch auch ihre Koexistenz begünstigen, und somit die Resistenz und Widerstandsfähigkeit eines Gesamtbestandes im Klimawandel erhöhen.

### *Resilienz, Resistenz und Toleranz*

In der Literatur werden zahlreiche Möglichkeiten aufgezeigt, die Reaktionen von Pflanzen auf Stressbedingungen, und somit auch auf anhaltende Trockenheit zu quantifizieren beziehungsweise qualitativ darzustellen. Trockenstress ist - wie alle anderen Arten von Stress - ein Belastungszustand, der in Folge von Abweichungen vom optimalen Zustand zu Schädigungen führen kann (Larcher, 2001, S. 282; Roloff et al., 2013, S. 175). Der „Stressor“ ist in diesem Fall der Wassermangel (Lösch, 2001, S. 389). Für die pflanzlichen Reaktionsmöglichkeiten gegenüber Trockenstress gibt es unterschiedliche Begriffe, wie „Trockenheitstoleranz“, „-resistenz“ und „-verträglichkeit“ oder die „Trockenstress-Toleranz“. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer

Standardisierung und Systematisierung. Lloret et al. (2011) unternahmen dazu einen erfolgreichen und vielfach zitierten Versuch. Mittels Jahrringanalysen an sehr abgelegenen und alten *Pinus ponderosa* Bäumen in den Rocky Mountains, entwickelten sie eine Systematik, um die Folgen von zurückliegenden Trockenphasen und Waldbränden auf das Wachstum dieser Bäume zu beschreiben. Sie unterteilten den übergeordneten Begriff der Resilienz in vier Indizes, welche miteinander verknüpft, gleichzeitig aber auch als komplementär zu verstehen sind. Darunter wurde die „Resistenz“ als Verhältnis zwischen der Wuchsleistung während und vor dem Stressereignis definiert. Demnach weist eine stressresistente Pflanze möglichst wenige Veränderungen in ihrer Funktionsweise angesichts einer potentiellen Stressbedingung auf. Dass sich ein trockenheitsresistenter Baum ebenso gut nach einem Stressereignis erholen kann (bei Lloret et al. (2011) als *recovery* definiert), gilt jedoch nicht automatisch; oft ist sogar das Gegenteil der Fall (Kunz et al., 2016; Moser-Reischl et al., 2019). So fanden Moser-Reischl et al. (2019) bei einem Vergleich von Winter-Linde und Robinie heraus, dass die Winter-Linde zwar während einer kurzen Trockenphase höhere Transpirationsraten als die Robinie aufrechterhalten konnte, sich dieser anisohydrische Wasserverbrauch verbunden mit einer Erschöpfung der Bodenwasserreserven jedoch anschließend in höheren Wachstumseinbußen niederschlug, während sich das isohydrische Verhalten der Robinie als nachhaltiger erwies. Das Verhältnis zwischen der Funktionsweise während und nach dem Stressereignis wird bei Lloret et al. (2011) als *resilienz per se* bezeichnet. Die Pflanzen reagieren auf Trockenstress oft mit einer Akklimatisierung der wichtigsten hydraulischen Parameter in Form verringerter Blattgrößen (Cinnirella et al., 2002), einer Zunahme des Wurzel-Spross-Verhältnisses (Lösch, 2001, S. 124ff.), einer höheren Resistenz gegenüber Kavitationen, verringerten Leitbahndurchmessern und einer höheren Holzdichte (Holste et al., 2006). Der Baum passt sich somit an zukünftige Stressereignisse besser an (Roloff, 2013). Wie man durch eine entsprechende Abhärtung die Trockenheitstoleranz von Arten und Sorten steigern kann, ist auch eine bedeutende Fragestellung für die Anzuchtphase in Baumschulen (siehe Kap. 2.3.2).

Zur vollständigen Berechnung der Indizes nach Lloret et al. (2011) werden Daten der Funktionsweise vor, während und nach einem Stressereignis benötigt. Bei vielen Studien stehen diese Daten aber nicht vollständig zur Verfügung. In diesem Fall besteht

auch die Möglichkeit, das Verhalten einer Art/Sorte unter Stressbedingungen im Vergleich zu der einer zeitgleich gemessenen Kontrolle zu untersuchen (Lloret et al., 2011; Kunz et al., 2016). Unabhängig davon, ob es sich um einen Vergleich zu einer Zeit, die vor dem Stressereignis liegt, oder um einen Vergleich mit einer Kontrolle handelt – als „resistent“ werden nachfolgend Arten und Sorten eingestuft, die in der Lage sind, unter Trockenstress ihre Leistung bezüglich Wachstum, Wasserverbrauch und anderen für die Kühlleistung relevanten Parametern auf einem relativ hohen Niveau halten zu können.

Der Resistenz-Begriff entstammt der Forstwissenschaft und ist mit dem Ziel verbunden, selbst bei Trockenheit hohe Erträge zu generieren. Im Falle von Stadtbäumen, bei denen die Wuchsleistung weniger bedeutend ist, ist die Suche nach resistenten Arten und Sorten jedoch nicht immer zielführend. Hier steht die Widerstandsfähigkeit der Bäume im Vordergrund, hohe Wuchsleistungen sind beispielsweise bei beengten Wuchsorten gar nicht erwünscht. Ein Baum kann auch – oder gerade dann – gut dauerhaft mit Trockenheit zurechtkommen, wenn er Ressourcen einspart (Moser-Reischl et al., 2019) oder den Kohlenstoff vorwiegend für den Aufbau der unterirdischen Wurzelbiomasse investiert (Lösch 2001, S. 124ff.). Dennoch sind Kenntnisse über die Trockenheitsresistenz von Straßenbäumen sehr wichtig, da sie diese Reaktionsmechanismen aufdecken können. Zusätzlich wird zur Resistenz jedoch auch der Begriff der „Trockenheitstoleranz“ eingeführt. Dieser soll allgemeiner die Fähigkeit von Arten und Sorten beschreiben, mit Trockenheit gut zurechtzukommen – ungeachtet etwaiger Verluste hinsichtlich Wuchs-, Transpirationsleistungen etc., welche zugunsten dieser Toleranz in Kauf genommen werden müssen.

#### 2.3.4 Auswirkungen der Anpassungen an Trockenheit für die Kühlleistung

*"The laws of physics and chemistry dictacte 'trade-offs' which restrict the evolutionary responses of plants (...) to a limited range of alternative solutions to the problems posed by environments" (Grime, 2001, S. xxviii)*

Grime erachtete die Klassifizierbarkeit terrestrischer Pflanzen in seinem Drei-Strategien-Modell der *competitors*, *stress-tolerators* und *ruderals* als das Ergebnis unvermeidbarer und identifizierbarer Zielkonflikte (engl. *trade-offs*) bezüglich der wichtigsten Funktionsweisen von Pflanzen. Einen *trade-off* definierte er dabei als ein evolutionäres

Dilemma, bei dem eine genetische Veränderung zu einer gesteigerten Leistungsfähigkeit bezüglich eines Umstandes unausweichlich ein Opfer bezüglich eines anderen Umstandes fordert (Grime, 2001, S. xxviii).

Die Idee der *trade-offs* ist auch anwendbar in Bezug auf den Zusammenhang zwischen der Trockenheitstoleranz und der Kühlleistung von Bäumen. Roloff et al. (2013, S. 178) wiesen beispielsweise darauf hin, dass an Trockenheit angepasste Baumarten häufig eine lichte Krone aufweisen und sich durch eine hohe Reiterationsfreudigkeit auszeichnen. Ersteres bestätigt auch eine Studie an ausgewachsenen Münchner Stadtbäumen (Moser-Reischl et al., 2019), der zufolge die Robinie als Lichtbaumart aus Lebensbereich (LB) 6 signifikant lichter belaubt, jedoch unter anderem infolge ihres wassersparenden Verhaltens besser an Trockenheit angepasst ist als die Winter-Linde als Schattenbaumart aus LB 3 (Abb. 4). Diese Wirkungsmechanismen haben letztendlich einen großen Einfluss auf die Höhe der zu erwartenden Verschattung und Kühlleistung durch Transpiration und werden im Folgenden dargelegt.

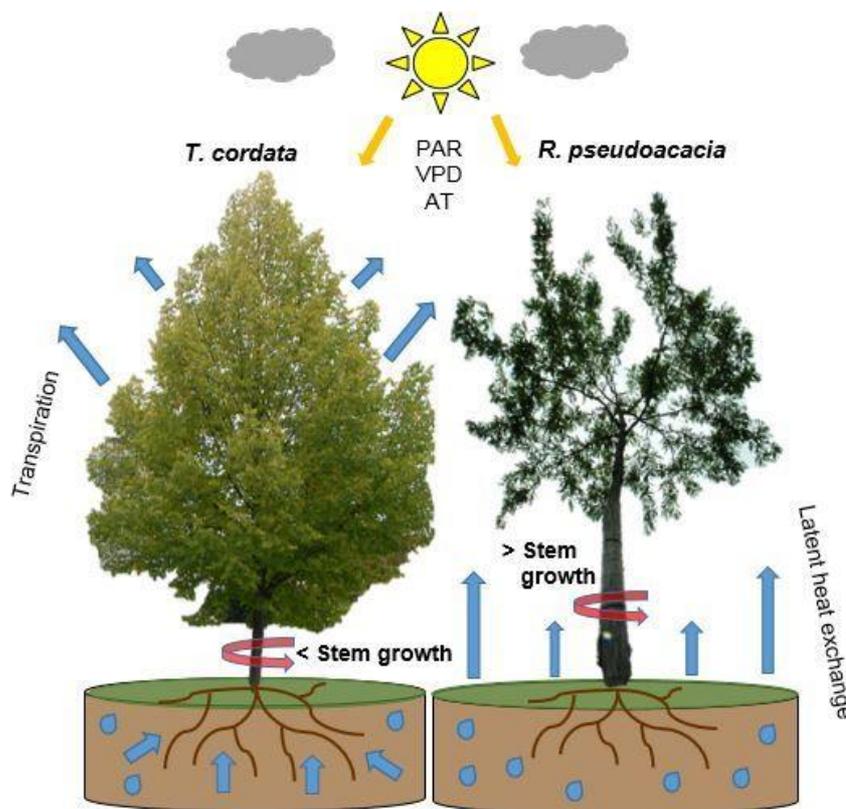


Abbildung 4. Schematisierte Darstellung des Habitus und der Evapotranspiration von zwei kontrastierenden Stadtbaumarten aus Moser-Reischl et al., 2019

Beispielsweise bei der stomatären Regulation der Wasserverluste (Kap. 2.3.3) wird deutlich, dass sich Anpassungen an Trockenheit zu Lasten der Kühlleistung von Bäumen auswirken können. Dies ergibt sich durch den unmittelbaren Zusammenhang zwischen der Wasserabgabe und der Kohlenstoffaufnahme über die Stomata: wird die stomatäre Leitfähigkeit gemindert, um Wasserverluste unter Stressbedingungen einzuschränken, so ist auch die Zufuhr von Kohlenstoffdioxid ins Blattinnere gehemmt. Ein eingeschränkter Gaswechsel führt zu verminderten Wuchs- und Transpirationsleistungen und folglich auch zu einer geringeren Verschattung und Kühlung durch Transpiration. Darüber hinaus stellen alle strukturell-morphologischen Blatteigenschaften trockenheitsadaptierter Gehölze, wie etwa dicke, behaarte Blätter, eine physische Transpirationsbarriere dar.

Studien zeigen jedoch auch, dass Arten aus trockeneren Ursprungshabitaten tendenziell eine höhere Wassernutzungseffizienz (WUE) sowohl auf Blatt- als auch auf Baumebene aufweisen (McCarthy et al., 2011; Stratópoulos et al., 2018; Moser-Reischl et al., 2019). So wurde bei der aus Steppengehölzen und Trockenwäldern stammenden Robinie bei Messungen in München mit durchschnittlich  $8,11 \text{ g l}^{-1}$  eine deutlich höhere WUE gemessen als bei der vornehmlich in frischen Waldhabitaten wachsenden Winter-Linde mit nur  $1,30 \text{ g l}^{-1}$  (Moser-Reischl et al., 2019). Das Wachstum von trockenheitsadaptierten Gehölzen ist demnach nicht notwendigerweise gering.

Die hohe Investition in die Wurzelbiomasse bei gleichzeitiger Reduktion der transpirierenden Blattbiomasse führt zu einem hohen Wurzel-Spross-Verhältnis. Bei dieser langfristigen Anpassung an Trockenheit (Kap. 2.3.3) gibt es zwei Mechanismen, die für die Kühlleistung von Stadtbäumen unterschiedlich wirksam sein könnten. Zum einen führt ein intensives Wurzelsystem zu einer Verbesserung der Wasseraufnahme. Durch die Ausdehnung des Wurzelsystems in die Tiefe und/oder Weite können zusätzliche Bodenwasserreserven erschlossen und somit der Wasserverbrauch aufrechterhalten werden (Lösch 2001, S. 396f.). Andererseits steht diese hohe Wurzelbiomasse einer geringen oberirdischen (Blatt-)Biomasse gegenüber. Wie am Beispiel der Robinie sichtbar wurde (Abb. 4), ist dadurch mit wenig Verschattung und Kühlung durch Transpiration zu rechnen.

Bei langanhaltender, starker Trockenheit könnte ein hohes Wurzel-Spross-Verhältnis jedoch essentiell für die Vitalität, Produktivität und somit auch die Kühlleistung von Bäumen sein, sodass trockenheitsadaptierte Gehölze in dieser spezifischen Situation sogar höhere Kühlleistungen erbringen könnten (Prado-Junior et al., 2016). Selbiges gilt auch für die Nutzung der stamminternen Wasserspeicher als kurzfristige Anpassung an Trockenheit (siehe Kap. 2.3.3, kurzfristige Anpassungen), wodurch zeitweilig hohe Wasserverluste kompensiert und damit die Transpiration aufrechterhalten werden könnte (Lösch, 2001, S. 402ff.).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Baumarten aus trockeneren Lebensraumbereichen Merkmale der Dürreanpassung aufweisen und sich daher besser für die städtische Verwendung eignen als Baumarten aus Lebensbereichen mit höherer Wasserversorgung (Kap. 2.3.2). Einige strukturell-morphologische und physiologische Anpassungen an Trockenheit gehen allerdings mutmaßlich zu Lasten des Kühlpotenzials, welches von der Biomasseproduktion und der Transpirationsleistung abhängt. Bisher sind empirische Belege selten, die diese Zusammenhänge bei unterschiedlichen Wuchsbedingungen aufzeigen und damit eine wissenschaftlich gesicherte Grundlage für die Wahl geeigneter Stadtbaumarten ermöglicht. Der in diesem Kapitel dargestellte Stand des Wissens, wirft eine Reihe von spezifischen Fragen auf, denen in dieser Dissertation nachgegangen werden soll. Sie lauten:

- (1) Wie beeinflusst die Herkunft die Phänologie, die Biomasseproduktion und den Wasserverbrauch und somit das Kühlpotenzial im Jahresverlauf?
- (2) Wie wirkt sich starke Trockenheit auf die Phänologie, die Biomasseproduktion und den Wasserverbrauch von Arten und Sorten aus den unterschiedlichen Lebensbereichen aus?
- (3) Welche Formen der Anpassung an Trockenheit weisen Gehölze, die in ihrem ursprünglichen Lebensbereich häufiger Wassermangel ausgesetzt sind, auf und wie beeinflussen diese ihr Kühlpotenzial?
- (4) Welche Empfehlungen können für die zukünftige klimaangepasste Wahl von Stadtbaumarten und -sorten abgeleitet werden?

### 3 Methodik

Im Rahmen dieser Dissertation wurde untersucht, was eine Verwendung von Gehölzen aus einem vergleichsweise trockenen Lebensbereich als Ersatz für häufig verwendete heimische Gehölze für die zu erwartende Kühlleistung bedeutet. Dafür dienten Ergebnisse einer zweijährigen Messkampagne in der städtischen Baumschule München-Laim, bei der sechs häufige Straßenbaumarten und Sorten aus Lebensbereichen mit unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit verglichen wurden. Die praktischen Untersuchungen umfassten Messungen zum Wasserverbrauch, zur Belaubung, phänologischen Entwicklungen, zum Wachstum und der Wurzelbiomasse der Bäume.

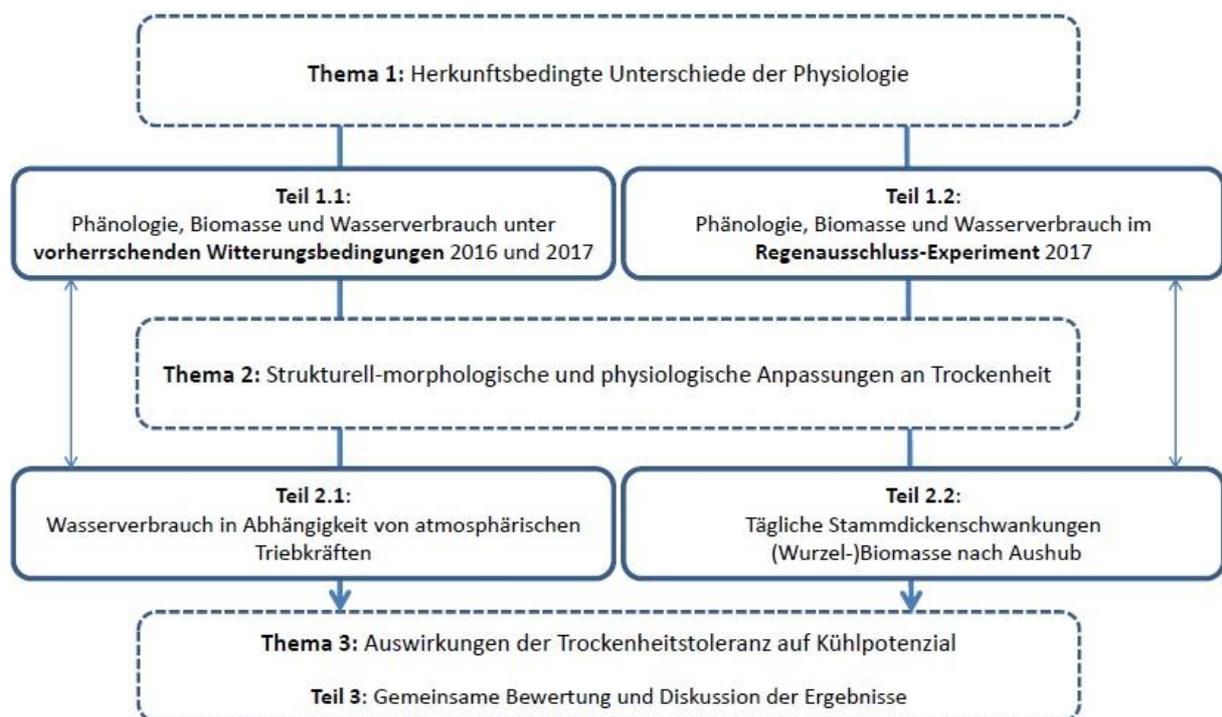


Abbildung 5. Gesamtmethodik der Dissertation

Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Gesamtmethodik der Dissertation. Die herkunftsbedingten Unterschiede bei Phänologie, Biomasse und Wasserverbrauch bildeten einen Themenbereich (**Thema 1**). Diese sind Parameter, welche das Kühlpotenzial von Bäumen nachweislich beeinflussen. Um die Leistungspotenziale von Arten und Sorten sowohl unter den momentanen als auch unter den zukünftigen

Wuchsbedingungen (Kap. 4.3) bewerten zu können, erfolgten die Messungen unter den vorherrschenden Witterungsbedingungen innerhalb zweier Messjahre (2016 und 2017) einerseits (**Teil 1.1**) als auch unter starker Trockenheit im Rahmen eines kontrollierten Regenausschlussexperimentes über eine gesamte Vegetationsperiode im zweiten Versuchsjahr (**Teil 1.2**). Innerhalb der beiden Untersuchungsteile wurden an geeigneten Stellen kurz- und langfristige physiologische und strukturell-morphologische Anpassungen an Trockenheit identifiziert (**Thema 2**), welche die Arten und Sorten aus dem trockeneren Lebensbereich aufwiesen und diese zu einer erhöhten Trockenheitstoleranz befähigten. Eine kurzfristige physiologische Anpassung, nämlich die stomatäre Sensitivität der untersuchten Gehölze gegenüber atmosphärischer Trockenheit, wurde mit Hilfe des Datensatzes aus **Teil 1.1** analysiert. Die Nutzung des stamintern gespeicherten Wassers als weitere kurzfristige Anpassung und die versorgende Wurzelbiomasse beziehungsweise das Wurzel-Spross-Verhältnis als langfristige morphologische Anpassungen waren Untersuchungen im Rahmen des Regenausschlussexperimentes (**Teil 1.2**). Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte schließlich die Konsequenz einer angepassten Arten- und Sortenwahl für die Verschattung und Kühlung durch Transpiration abgeleitet (**Thema 3/Teil 3**) und damit Empfehlungen für eine klimaangepasste Arten- und Sortenwahl ausgesprochen werden. Zugunsten der Nachvollziehbarkeit wurden die Themenfelder in der vorliegenden Dissertation jedoch nicht separat bearbeitet. Stattdessen wurden die Untersuchungsergebnisse in absteigender Richtung, angefangen im Kronenraum (Phänologie, Kronendimensionen und Belaubung), über die Stammebene (Wasserverbrauch und Wachstum) bis zu den Daten der unterirdischen Wurzelbiomasse, dargelegt (siehe Abb. 12 am Ende des Methodenteils).

### **3.1 München als Untersuchungsgebiet**

Die bayerische Landeshauptstadt München liegt in Oberbayern und gehört geologisch zur Münchener Schotterebene, welche ein über mehrere Eiszeiten und durch den Überschwemmungsbereich des Flusses Isar entstandener Sander ist. Die Stadt befindet sich in der warm-gemäßigten Klimazone im Übergangsbereich des maritimen Klimas Westeuropas zu einem kontinentalen Klima in Osteuropa. Das Wettergeschehen wird, neben lokalen Effekten wie dem Föhn und dem voralpinen Steigungsregen, durch die

Wetterlagen der Westwindzone bestimmt. Die Niederschläge und Temperaturen betragen im langjährigen Mittel (1981-2010) 944 mm und 9,7 °C gemessen an der Klimastation München-Stadt (48°09'47"N 11°32'34"E, 515 m ü. NN) des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2019a). Der im Mittel wärmste und niederschlagreichste Monat ist der Juli (19,4 °C), der kälteste Monat ist der Januar (0,3 °C) und der Monat mit dem geringsten Niederschlag der Februar (46 mm) (Tabelle 5).

Die bayerische Landeshauptstadt (LH) München hat eine Fläche von 311 km<sup>2</sup> und über 1,5 Millionen Einwohner (LH München, 2018). Der öffentliche Grünflächenanteil liegt mit 3.262 ha bei rund 6,5 %, was 25 m<sup>2</sup> pro Einwohner entspricht (Stand: 2013; Daten über persönliche Kommunikation mit Abteilung Gartenbau, 2020). Die Stadt zeigt eigenständiges Engagement bei Maßnahmen zur Klimawandelanpassung (LH München, 2016a) und der Optimierung von Wuchsstandorten für Straßenbegleitgrün (LH München, 2016b). In der Stadt stehen etwa 110.000 Bäume entlang von 750 km Straße und jährlich gibt es 2.500-3.000 Neupflanzungen. Aufgrund sichtbarer Vitalitätsverluste bei den Stadtbäumen durch Klimaänderungen und Krankheiten, werden für diese Neupflanzungen zunehmend hitze- und trockenheitsverträgliche Arten und Sorten aus Lebensbereichen mit hoher Stressbelastung gewählt (LH München, 2019b). Trotz des Klimawandels ist eine Bewässerung, bis auf die ersten drei Jahre der Anwachsphase, nach wie vor nicht vorgesehen. Gleichzeitig stellt die geographische Lage Münchens hohe Anforderungen an die Frosttoleranz von Stadtbäumen.

### **3.2 Versuchsstandort städtische Baumschule München-Laim**

Sämtliche Gehölze für die Stadt entstammen der städtischen Baumschule München-Laim im Südwesten Münchens (48°08'05"N 11°28'47"E, 534 m ü. NN). In dem 40 Hektar großen Areal stehen rund 200 Arten und Sorten von Bäumen und Sträuchern in verschiedenen Wachstumsstadien, die nach spätestens vier Jahren entsprechend FLL-Anforderungen (FLL, 2010) in die Stadt verpflanzt werden.

Der vorherrschende Bodentyp ist eine Parabraunerde mit mittlerer bis großer Entwicklungstiefe (LH München, 2019a). Ein Gemisch aus Erde und hohem Kiesanteil, die sogenannte Rotlage, bildet einen 0,5-0,75 m tiefen Übergangshorizont zwischen Humusdecke und Schotterlage, die im Münchner Süden 25-30 m beträgt (Kerl et al., 2012). Im Vergleich zu den üblichen Straßenbaumstandorten in München erfolgt die

Pflanzung der Baumschulbäume somit nicht in Substraten. Der Grundwasserspiegel ist mindestens zehn Meter tief; Baumwurzeln kommen somit nicht mit dem Grundwasser in Kontakt. Bepflanzungen innerhalb der Baumschule erfolgen prinzipiell innerhalb von Planquadraten („Quartieren“) in parallelen Reihen, aber versetzt (Quincum-Raster) mit einem Abstand von zwei Metern innerhalb einer Reihe und drei Metern zwischen den Reihen (Abb. 7). Die Baumschulbäume werden während ihrer vier Standjahre regelmäßig geschnitten, um tragfähige, stabile Kronen zu generieren. Bewässert werden sie nur im ersten Standjahr. Zweimal jährlich wird mit  $30 \text{ g m}^{-2}$  in Kalenderwoche 13 und mit  $20 \text{ g m}^{-2}$  in Kalenderwoche 26 das Düngemittel Compo Nova Tec (NPK Mg 15/3/20/3) appliziert, Pflanzenschutzmittel finden hingegen keine Verwendung.

Im Vergleich zur Stadt weist die Baumschule somit nur eine sehr geringe Variation hinsichtlich mikroklimatischer, edaphischer und topographischer Bedingungen auf. Aufgrund der hohen Bedeutung von den Standortbedingungen für das Wachstum und den Wasserverbrauch von Bäumen (Kap. 2.2.2, 2.2.3), stellen diese homogenen Wuchsbedingungen geeignete Bedingungen für einen Vergleich zwischen Arten und Sorten dar. Darüber hinaus ergibt sich aufgrund der regelmäßigen Quartiersbepflanzung, den einheitlichen Pflegemaßnahmen und Bezugsquellen pro Art/Sorte und Standjahr eine gute Vergleichbarkeit zwischen Messungen an Einzelbäumen. Jenseits art- und sortenspezifischer Unterschiede können die Beeinträchtigungen aufgrund der städtischen Wuchsbedingungen jedoch nicht abgebildet werden. Zu diesem Aspekt existieren allerdings bereits Studien, welche im stark anthropogen überprägten Münchener Stadtgebiet durchgeführt wurden (Moser et al., 2017; Rahman et al., 2017a; 2017b; 2018; 2019). Ein Erkenntnisgewinn durch unterschiedliche experimentelle Ansätze ist wünschenswert, um ein möglichst umfassendes Bild über das Verhalten von Arten und Sorten unter wechselnden Umweltbedingungen zu erhalten.

### **3.3 Untersuchte Arten und Sorten**

Die Auswahl von Arten und Sorten erfolgte in enger Abstimmung mit dem Münchener Baureferat, Abteilung Gartenbau, der die städtische Baumschule untersteht. Trotz eines hohen Arten- und Sortenspektrums wird in München, wie auch in vielen anderen mittel- und nordwesteuropäischen Städten (Pauleit et al., 2002), der innerstädtische

Baumbestand derzeit von einigen wenigen Gattungen dominiert (Abb. 6). Bei den Straßenbäumen dominieren mit über 60 % Linden und Ahorne, wobei davon den Großteil (jeweils fast 40 %) Winter-Linde (*Tilia cordata*) und Spitz-Ahorn (*Acer platanoides*) ausmachen. Diese stammen beide aus einem frischen Waldhabitat, welches nach Kiermeier (1992) als Lebensbereich (LB) 3 artenreiche Wälder und Gehölzgruppen bezeichnet wird. Jenseits dieses Lebensbereiches sind zu einem deutlichen geringeren, jeweils einstelligen Anteil vor allem Gehölze aus den Lebensbereichen Auen- und Ufergehölze (LB 2; v.a. *Fraxinus excelsior* und *Platanus x hispanica*), Steppengehölze und Trockenwälder (LB 6; v.a. *Robinia pseudoacacia* und *Sorbus spec.*) und kühlfeuchte Wälder (LB 7; v.a. *Acer pseudoplatanus* und *Aesculus hippocastanum*) anzutreffen.

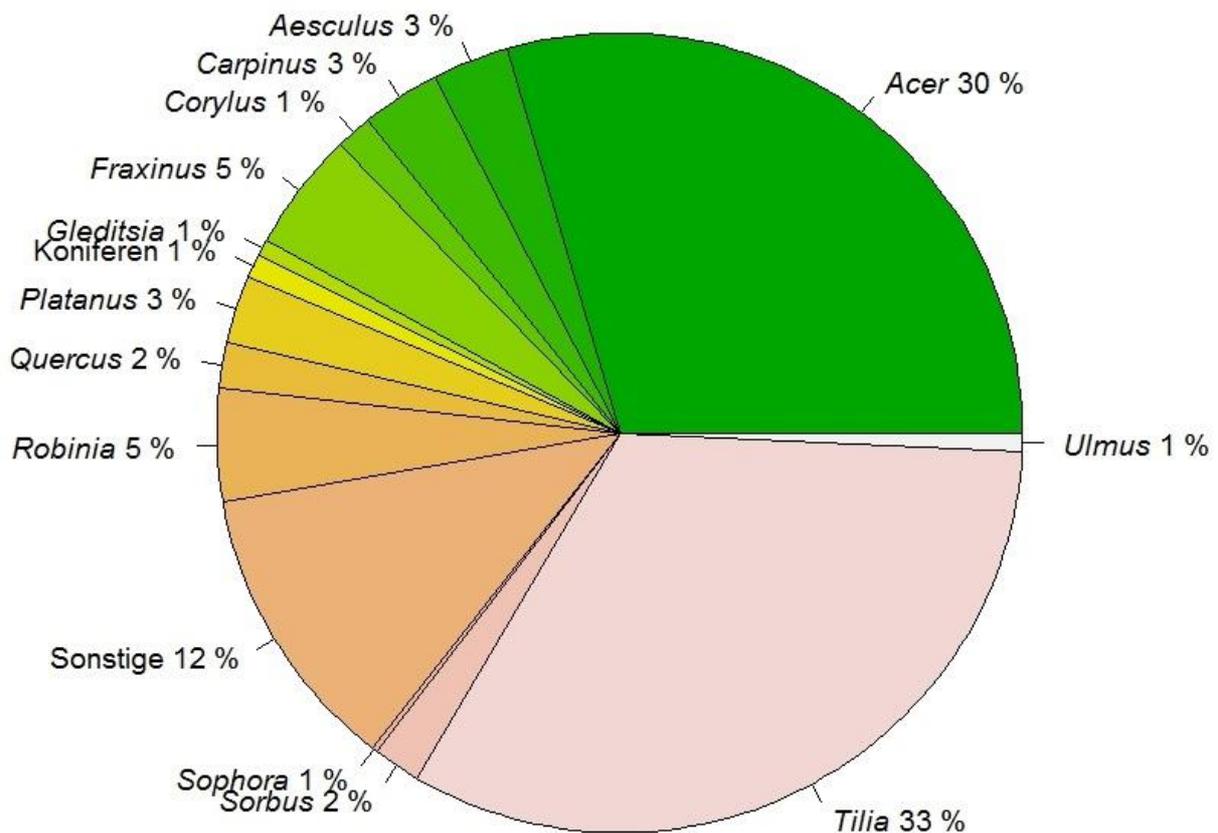


Abbildung 6. Münchner Straßenbäume nach Gattungen oder Pflanzenfunktionstyp (Koniferen). Eigene Darstellung nach Daten der LH München, Baureferat, Abteilung Gartenbau, Stand 2018, Prozentwerte gerundet.

In der Absicht, die Widerstandsfähigkeit des innerstädtischen Baumbestandes gegenüber biotischen und abiotischen Stressoren, insbesondere gegenüber den

klimatischen Veränderungen, zu erhöhen (Kap. 4.3), werden für Neupflanzungen vorwiegend Gehölze aus dem relativ trockenen LB 6 in Betracht gezogen. Dies betrifft die bereits lange gepflanzten Arten wie Robinie und Silber-Linde, allerdings auch Arten, wie beispielsweise die Hopfenbuche (*Ostrya carpinifolia*) oder den Japanischen Schnurbaum (*Sophora japonica*), die aktuell sehr stark im Interesse der städtischen Pflanzenverwendung stehen.

Aufgrund der aktuellen Relevanz wurde das Kühlpotenzial von Gehölzen aus dem relativ trockenen LB 6 mit dem von etablierten heimischen Gehölzen aus dem LB 3 verglichen. Dafür wurden jeweils sechs bis acht Individuen von sechs sommergrünen und zerstreutporigen Baumarten und Sorten ausgewählt. Eine Gruppe bildeten *Acer platanoides* L. (Spitz-Ahorn), *Carpinus betulus* L. 'Fastigiata' (Säulen-Hainbuche) und *Tilia cordata* Mill. 'Greenspire' (Amerikanische Stadt-Linde) als häufig gepflanzte, etablierte Straßenbaumarten und Sorten aus LB 3. Zu diesen Arten und Sorten wurde jeweils eine verwandte Art oder Sorte aus LB 6 gewählt, die ebenfalls relativ häufig im Münchner Straßenraum gepflanzt wird. Die zweite Gruppe bildeten *Acer campestre* L. (Feld-Ahorn), *Ostrya carpinifolia* Scop. (Hopfenbuche) und *Tilia tomentosa* 'Brabant' Moench (Brabanter Silber-Linde), als Arten und Sorten, über die noch weniger Erfahrungswerte vorliegen. Allerdings haben sie sich bereits in einigen Untersuchungen als zukunftsfähig für die Pflanzung im Straßenraum (Fini et al., 2009; Hiemstra, 2011; Sjöman et al., 2018; GALK, 2019; LWG, 2019) und als trockenheitstoleranter als die Gehölze aus LB 3 erwiesen (Tabelle 1). Die Untersuchung beschränkte sich auf Gehölze mit zerstreutporiger Holzanatomie, weil die zur Bestimmung des Wasserverbrauches verwendeten Messsensoren (Kap. 3.8.3) eine Mindesttiefe des wasserleitenden Xylems von 2 cm erforderten, welche bei ringporigen Jungbäumen in der Baumschule nicht gewährleistet werden konnte (siehe Kap. 2.2.3). Neben der Holzanatomie und ihrer jeweiligen Relevanz als Straßenbegleitgrün in München spielten bei der Wahl der Arten und Sorten zuletzt auch praktische Gesichtspunkte eine Rolle. Xylemfluss- und Bodenfeuchtesensoren konnten bei Arten und Sorten, die räumlich dicht beieinander gepflanzt wurden, mit derselben Infrastruktur (z.B. Datenlogger, Stromversorgung) gesteuert und versorgt werden, was sich positiv auf Kosten und Messaufwand auswirkte.

Die Vergleiche erfolgten sowohl gruppenweise auf Basis der Lebensbereiche als auch zwischen den zwei jeweils am nächsten verwandten Arten/Sorten im paarweisen Vergleich. Dass der Feld-Ahorn im Gegensatz zu der aus Kleinasien stammenden Hopfenbuche und der aus dem Balkan stammenden Brabanter Silber-Linde heimisch ist, stellte einen zusätzlichen Unterschied innerhalb der Gruppe LB 6 dar.

Aufgrund der negativen Korrelation zwischen Trocken- und Schattentoleranz (Niinemets & Valladares, 2006) wurden auch Informationen über die Schattentoleranz der Gehölze berücksichtigt. Allerdings konnten hierfür nur Daten für reine Arten ermittelt werden. Diesbezüglich weist der Spitz-Ahorn die höchste und der Feld-Ahorn die niedrigste Toleranz auf (Niinemets & Valladares, 2006; Tabelle 1). Zugunsten einer besseren Lesbarkeit wurden für Abbildungen die Abkürzungen aus Tabelle 1 entnommen.

Handelt es sich bei der hier vorliegenden Auswahl um Sorten, werden diese aus gestalterischen aber hauptsächlich aus funktionalen Gründen der jeweils reinen Art vorgezogen. Aus praktischer Sicht ist es wichtig, dass die Bäume für die Pflanzung in der Stadt einen durchgehenden Leitstamm und gut verzweigte Kronen entwickeln („aufastbar“ sind). Speziell als Straßenbäume werden darüber hinaus gerne schmal wachsende Sorten gepflanzt. Die Sorte *Tilia tomentosa* 'Brabant' wird in München bevorzugt verwendet, da sie eine kompaktere Krone aufweist und einen durchgehenden Leittrieb ausbildet im Vergleich zur reinen Art, welche häufig Schlitzäste bildet, mehrstämmig und sehr rundkronig wächst. Bei der Amerikanischen Stadt-Linde wird durch Züchtung versucht, die starke Unregelmäßigkeit im Kronenaufbau zu mindern. Die Sorte zeichnet sich durch eine schmale, regelmäßige und dichte Krone aus (GALK, 2019). Bei der Säulen-Hainbuche wird der stark kegel- bis säulenförmige Kronenaufbau geschätzt. Beide letztgenannten Sorten werden als wuchsschwach gezüchtet. Ausführliche Steckbriefe für die untersuchten Arten und Sorten befinden sich im Anhang.

Im Falle aller Sorten handelte es sich ausschließlich um Fußveredelungen. Die Wurzelunterlagen bei *Tilia cordata* 'Greenspire' und bei *Carpinus betulus* 'Fastigiata' stammten von der jeweils reinen Art, *Tilia tomentosa* 'Brabant' wurde jedoch auf Wurzelunterlagen der Sommer-Linde (*Tilia platyphyllos*) gepfropft (Tabelle 2), da das

Vermehrungsmaterial der Silber-Linde begrenzt ist und die Sommer-Linde sich durch eine stärkere Wüchsigkeit auszeichnet. Die Sommer-Linde stammt aus LB 3, bevorzugt relativ frische, kalk- und nährstoffreiche Böden (Godet, 2011) und ist somit nicht an Wassermangel angepasst. Eine Zuordnung der Brabanter Silber-Linde zu dem trockeneren LB 6 muss daher kritisch gesehen werden und etwaige Effekte, die aufgrund der Kombination genetisch unterschiedlicher Pflanzenteile entstehen, bei den Ergebnisinterpretationen in Betracht gezogen werden.

Tabelle 1. Geographische Herkunft und Einordnung der Schatten- und Trockenheitstoleranz der sechs untersuchten Arten und Sorten. Verändert und um die Straßenbaumtests erweitert nach Stratópoulos et al. (2019b).

	Familie	Verbreitung <sup>1</sup>	Schatten-toleranz <sup>2</sup>	Trockenheits-toleranz <sup>2</sup>	Getestet bei
1 Häufig verwendete heimische Arten und Sorten aus <b>Lebensbereich 3 artenreiche Wälder und Gehölzgruppen<sup>1</sup></b>					
Spitz-Ahorn, <i>Acer platanoides</i> (Ap)	Seifenbaumgewächse <i>Sapindaceae</i>	Europa (außer britische Inseln), Kaukasus	4,20 ± 0,37	2,73 ± 0,16	GALK
Säulen-Hainbuche, <i>Carpinus betulus</i> 'Fastigiata' (Cb)	Birkengewächse <i>Betulaceae</i>	Europa, Kaukasus, asiat. Türkei, Iran	3,97 ± 0,12	2,66 ± 0,16	GALK
Amerikanische Stadt-Linde, <i>Tilia cordata</i> 'Greenspire' (Tc)	Malvengewächse <i>Malvaceae</i>	Europa, Kaukasus, N-Iran, W-Sibirien	4,18 ± 0,16	2,75 ± 0,15	GALK, Münster-Wolbeck, INKA BB
2 Vielversprechende Arten und Sorten aus <b>Lebensbereich 6 Steppengehölze und Trockenwälder<sup>1</sup></b>					
Feld-Ahorn <i>Acer campestre</i> (Ac)	Seifenbaumgewächse <i>Sapindaceae</i>	Europa, Kaukasus, asiat. Türkei, N-Iran, Marokko, Algerien	3,18 ± 0,14	2,93 ± 0,32	GALK, Stadtgrün 2021, Münster-Wolbeck, AdapTree, INKA BB
Hopfenbuche, <i>Ostrya carpinifolia</i> (Oc)	Birkengewächse <i>Betulaceae</i>	Frankreich, Apennin, Schweiz, Österreich, Ungarn, Balkan, asiat. Türkei, Syrien, Kaukasus	3,94 ± 0,18	3,07 ± 0,17	GALK, Stadtgrün 2021, Hiemstra 2011, Münster-W., INKA BB
Brabanter Silber-Linde, <i>Tilia tomentosa</i> 'Brabant' (Tt)	Malvengewächse <i>Malvaceae</i>	Balkan, östl. Zentraleuropa, asiat. Türkei, Syrien	3,34 ± 0,34	2,81 ± 0,12	GALK, Stadtgrün 2021, Münster-Wolbeck, INKA BB

<sup>1</sup>nach Kiermeier (1992)

<sup>2</sup>nach Niinemets & Valladares (2006, Anhang). Die Toleranzskalen reichen von 0 (keine Toleranz) bis 5 (maximale Toleranz). Die Werte beziehen sich auf reine Arten.

### **3.4 Anforderungen an die Gehölzverwendung aus Sicht der Praxis**

Neben den allgemeinen Erfahrungswerten werden in München aufgrund der Teilnahme am GALK Straßenbaumtest auch systematisch Daten zu der Eignung von Arten und Sorten im Straßenraum erfasst. Dies geschieht über jährliche Bonituren an mindestens fünf Testbäumen einer Art oder Sorte im Stadtgebiet. Mit dem leitenden Personal der städtischen Baumschule München-Laim, Herrn Leander Wilhelm und Herrn Peter Schlinsog, konnten daher die Anforderungen an die urbane Gehölzverwendung aus Sicht der Praxis diskutiert werden. Dies erfolgte innerhalb der Jahre 2016 bis 2019 mittels sechs halbstrukturierter Interviews, deren Inhalte für die Ergebnisdiskussion dieser Arbeit genutzt werden.

### **3.5 Versuchsaufbau**

Für einen Vergleich der Arten und Sorten wurden zur Zeit der Auswahl im Frühjahr 2016 sämtliche Versuchsbäume aus der Stammumfangklasse 16-18 cm (gemessen auf 1 m Höhe) gewählt, welche im Frühjahr 2014 als 3xv 14-16 Hochstämme zuletzt verschult wurden (Tabelle 2). Somit befanden sich die Bäume im ersten Versuchsjahr 2016 im dritten Standjahr und im zweiten Versuchsjahr 2017 im vierten Standjahr. Dieser Jahrgang wurde ausgewählt, da sich die Wurzelsysteme bereits zwei Jahre an demselben Standort entwickeln konnten und somit keine Gefahr einer Beeinträchtigung durch einen Pflanzchock zu befürchten war. Alle Individuen pro Art beziehungsweise Sorte stammten aus derselben Bezugsquelle, wo sie üblicherweise im Alter von acht bis neun Jahren eingekauft werden (siehe Anhang). Spitz-Ahorn, Hopfenbuche und Brabanter Silber-Linde wurden wurzelnackt gepflanzt, Feld-Ahorn, Säulen-Hainbuche und Amerikanische Stadt-Linde balliert. Der Ballendurchmesser bei 14-16 Hochstämmen beträgt erfahrungsgemäß etwa 50 bis maximal 60 cm, die Ballenhöhe etwa 40 cm. Bei ballierten Bäumen erfolgt kein Wurzelschnitt, bei Bäumen ohne Ballen hingegen schon. Zu lange, deformierte oder beschädigte Wurzeln werden zurückgeschnitten. Es verbleibt hier ebenfalls ein Wurzeldurchmesser von ca. 50 bis maximal 60 cm.

Tabelle 2. Basisdaten der untersuchten Arten und Sorten. Bei den Durchmessern und den Höhenangaben handelt sich um August-Werte des Jahres 2016.

Art/Sorte	Quartier	Ballierung [ja/nein]	Wurzelunterlage	Stamm- durchmesser [cm ± SD]	Höhe [m ± SD]
<i>Acer platanoides</i>	B	Nein	--	5,77 ± 0,20	6,50 ± 0,55
<i>Acer campestre</i>	A	Ja	--	5,45 ± 0,10	6,10 ± 0,00
<i>Carpinus betulus</i> 'Fastigiata'	A	Ja	<i>Carpinus betulus</i>	5,44 ± 0,10	6,67 ± 0,26
<i>Ostrya carpinifolia</i>	B	Nein	--	5,73 ± 0,22	6,00 ± 0,00
<i>Tilia cordata</i> 'Greenspire'	A	Ja	<i>Tilia cordata</i>	5,81 ± 0,19	5,12 ± 0,04
<i>Tilia tomentosa</i> 'Brabant'	B	Nein	<i>Tilia platyphyllos</i>	6,30 ± 0,19	5,83 ± 0,41

Die Arten und Sorten standen auf drei Quartiere verteilt (Quartiere 6, 11 und 12), zwischen 450 m und 600 m von den Betriebsstätten der Baumschule entfernt. Diese Quartiere befanden sich in einem öffentlich zugänglichen Bereich, während sich die Betriebsstätten inklusive der einzigen Stromquelle in einem eingezäunten Areal befanden, das über Nacht geschlossen wird. Dadurch ergaben sich erhöhte Anforderungen an die Sicherung der verwendeten Messgeräte und der zugehörigen Infrastruktur, insbesondere den Datenloggern. Die Stromversorgung in den Quartieren wurde mittels ober- und – zu einem geringeren Teil auch – unterirdisch geführten Kabeln mit hohem IP-Schutz gewährleistet (Abb. 7).



Abbildung 7. Oberirdische Kabelführung entlang der Baumkronen der in Reihen gepflanzten künftigen Stadtbäume. Das abgebildete Quartier befindet sich am Südrand des nichtöffentlichen Bereiches der Baumschule.

Am südlichen Ende des Quartiers 6 standen Feld-Ahorn, Säulen-Hainbuche und Amerikanische Stadt-Linde. Der in Quartier 11 stehende Spitz-Ahorn befand sich nur durch einen Weg getrennt dicht neben der in Quartier 12 stehenden Hopfenbuche und Brabanter Silber-Linde. Aus diesem Grund wurde für dieses Areal auch nur eine Versorgungsinfrastruktur (Datenlogger, Stromanschluss, Aufbewahrungsschrank) aufgebaut. Aus Vereinfachungsgründen wird somit im Folgenden auch nur von zwei Quartieren gesprochen – dem Quartier „A“ (Quartier 6) und dem Quartier „B“ (Quartiere 11 und 12) (Abb. 8).



Abbildung 8. Areal der städtischen Baumschule München-Laim. Die Betriebsstätten inklusive der für die Versuchsdurchführung notwendigen Stromversorgung befanden sich im nichtöffentlichen Bereich der Baumschule im Gegensatz zu den mehrere hundert Meter entfernten Versuchsquartieren, welche für die Öffentlichkeit zugänglich sind.

### *Regenausschlussexperiment*

Um die Leistungspotenziale der untersuchten Arten und Sorten auch unter künftigen Bedingungen zu testen (Teil 1.2, Abb. 5) und die art- und sortenspezifischen Anpassungen an Trockenheit zu untersuchen (Teil 2.2), wurde im zweiten Versuchsjahr durch eine Regenausschluss-Konstruktion versucht, langanhaltende extreme Bodentrockenheit herbeizuführen. Dieses kontrollierte Trockenstressexperiment ist eine Neuerung in der Stadtbaumforschung, denn bislang beschränkten sich die Untersuchungen auf Baumreaktionen unter atmosphärischer Trockenheit und witterungsabhängigen Schwankungen der Bodenfeuchte (siehe Kap. 2.3.4).

Im Mai 2017 wurden wasserfeste, transparente Gewebeplanen (2 x 3 m) entlang der Baumstämme von 50 % der Individuen auf 1 m Höhe befestigt, welche in die nord- und südlichen Richtungen abschüssig gespannt und mit Hilfe von Eisenstangen circa 2,8 m entfernt von den Bäumen im Boden fixiert wurden. Auch in westliche und östliche Richtung ragten die Planen über die am Rand stehenden Bäume hinaus (Abb. 9). Der Aufbau des Versuches erfolgte vom 11. bis 17. Mai 2017. Die zelt-ähnlichen Konstruktionen sollten großzügig den Wurzelraum der Bäume vor dem Eindringen von Niederschlag schützen (Trockenvariante). Die übrigen 50 % der Bäume wurden den vorherrschenden Witterungsbedingungen ausgesetzt und fungierten als Kontrollgruppe. Beide Behandlungsvarianten bestanden aus je drei bis vier Bäumen pro Art/Sorte. Im Falle des Feld-Ahorns, der Hopfen- und Säulen-Hainbuche standen alle Bäume in einer Pflanzreihe, wobei zwischen der Trocken- und der Kontrollvariante mindestens ein nicht dem Versuch angehöriger Baum als Abstandshalter diente. Bei den Linden und dem Spitz-Ahorn waren die Bäume über zwei bis drei Pflanzreihen verteilt. Die Dürre wurde über die gesamte Vegetationsperiode von Mitte Mai bis Mitte November 2017 induziert.

Bis auf den Spitz-Ahorn wurden innerhalb des Sommers bei den weiteren fünf Arten und Sorten Bodenfeuchtwerte unterhalb des permanenten Welkepunktes erreicht, die sich signifikant von denen der Kontrollen unterschieden (Kap. 4.1.2). Damit wurde die Dauer und Intensität des Regenausschlussexperimentes als ausreichend erachtet, um physiologische Reaktionen bei diesen fünf Arten und Sorten hervorzurufen.

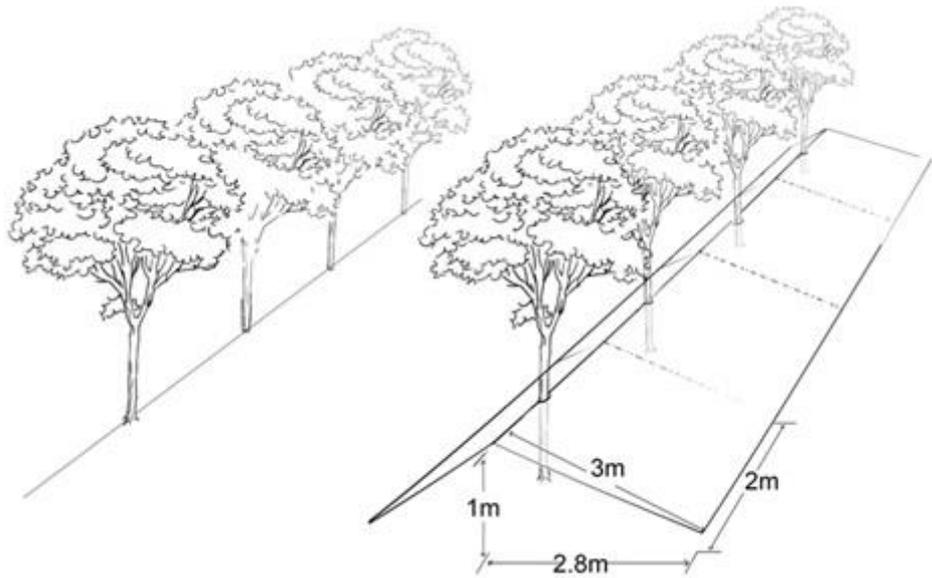


Abbildung 9. Schematisierter Aufbau des Regenausschlussesperiments. Die Wurzelbereiche der Bäume rechts im Bild wurden großzügig durch Gewebeplanen abgedeckt (Trockenvariante), während die Bäume auf der linken Seite die fallenden Niederschläge erhielten (Kontrolle). Bereits veröffentlicht in Stratópoulos et al., 2019a.

### 3.6 Standortklima

Die Phänologie (Chmielewski & Rötzer, 2001), das Wachstum (Moser et al., 2017; Moser-Reischl et al., 2019) und die Transpiration (Oren et al., 1998; Bush et al., 2008; Peters et al., 2010; Pataki et al., 2011; Gillner et al., 2015a) von Bäumen werden von zahlreichen meteorologischen Parametern beeinflusst. Aus diesem Grund erfolgten parallel zu den Untersuchungen an den Bäumen kontinuierliche Messungen von Klimavariablen. Mit Hilfe einer freistehenden Wetterstation (Davis Vantage Pro2, Davis Instruments, Hayward, USA) wurden 40 m östlich vom Baumschulbüro auf einem unbepflanzten Quartier (Abb. 8) unter anderem die meteorologischen Variablen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und -richtung erfasst. Die photosynthetisch aktive Strahlung (engl. *photosynthetically active radiation*, PAR;  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), der sichtbare Bereich der kurzwelligigen solaren Einstrahlung zwischen 400 nm und 700 nm, welcher von Pflanzen für die Photosynthese genutzt wird, wurde direkt auf Quartier B mit einem Quantensensor (LI-190, LI-COR Biosciences, Lincoln, USA) gemessen. Dieser war auf dem Dach eines Aufbewahrungsschranks für Versuchszubehör platziert.

Je nach Bedarf wurden Klimaparameter in ein- bis fünf minütigen Messintervallen erfasst und für die weitere Datenanalyse zu fünf- oder zehnminütigen Mittelwerten zusammengefasst. Für den Fall einer Unterbrechung der Stromversorgung und somit eines Ausfalls der Messinstrumente wurde auf Klimadaten des DWD von der am nächsten liegenden Station München-Stadt (48°09'47"N 11°32'34"E, 515 m ü. NN) zurückgegriffen (DWD, 2019a).

Das Sättigungsdefizit der Luft (hPa; VPD) als eine entscheidende Triebkraft der Transpiration (Kap. 2.2.2) wurde aus den Daten für die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit berechnet und für weiterführende Analysen der Korrelation zwischen täglichem Wasserverbrauch und VPD im Jahresverlauf auf die Tageslänge normalisiert (Dz; Ewers et al., 2001).

### **3.7 Edaphische Bedingungen**

#### **3.7.1 Bodenwassergehalt**

Auch die Bodenfeuchte ist eine wichtige Steuerungsgröße für das Wachstum (Kunz et al., 2016; Moser-Reischl et al., 2019) und die Transpiration von Bäumen (siehe Kap. 2.2.2). Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten der direkten (durch Wägung) und indirekten Bestimmung dieser (Verstraeten et al., 2008). In stadttökologischen Studien haben sich im Wesentlichen zwei Techniken durchgesetzt. Zum einen wird sie über den volumetrischen Bodenwassergehalt, dem Anteil des Wasservolumens am Gesamtvolumen (Vol.-%; engl. *volumetric soil water content*; VWC), bestimmt. (z.B. Peters et al., 2010; McCarthy et al., 2011; Rahman et al., 2015). Die meistgewählte Alternative ist die indirekte Bestimmung der Bodenfeuchte über die Saugspannung (hPa), die den Druck beschreibt, unter dem Wasser im Boden steht (z.B. Rahman et al., 2017a; 2017b; 2018). Diese Saugspannung ist eng mit dem Wassergehalt eines Bodens verbunden. Je trockener ein Boden ist, desto höher die Saugspannung. Bei Gillner et al. (2015a) wurden sogar beide Techniken angewandt. Darüber hinaus wird in neuesten Studien zusätzlich zur Bodenfeuchte auch vermehrt die Bodentemperatur gemessen (Rahman et al., 2017a; 2017b; 2018).

Bei beiden Techniken erfolgen lokale Messungen entweder mit Hilfe tragbarer Messgeräte oder mit kontinuierlich im Boden vergrabenen Sensoren. Bei der Saugspannungsmethode wird die Spannung gemessen, mit der Wasser im Boden zurückgehalten wird. Dieser Ansatz liefert Informationen zur „Kraft“, die eine Pflanze aufwenden muss, um über die Wurzeln Wasser aus dem Boden zu ziehen. Sie liefert jedoch keine Informationen zum absoluten Gehalt an Bodenwasser, wie bei der Messung des VWC. Darüber hinaus sind Tensiometer oder Watermark Sensoren zur Bestimmung der Saugspannung meist teurer als Sensoren zur Messung des VWC. Wiederum sind die Messwerte der Saugspannung im Vergleich zu VWC-Messungen übertragbar, d.h. die Bodenart, in der gemessen wird, spielt keine Rolle. VWC-Sensoren liefern hingegen Informationen über die in einer Volumeneinheit Boden enthaltene Wassermenge inklusive dem nicht pflanzenverfügbaren Totwasser. Da sich der Anteil an pflanzenverfügbarem Wasser von Bodenart zu Bodenart stark unterscheidet, müssen zusätzliche Kenntnisse über die örtlichen Bodeneigenschaften vorliegen und somit ist die Interpretation der Messwerte anspruchsvoller als bei Saugspannungswerten. Darüber hinaus sind VWC-Sensoren empfindlich gegenüber Schwankungen der Bodentemperatur, weil diese einen Einfluss auf die dielektrischen Eigenschaften des Bodens haben.

Bei beiden Messsystemen ist ein sachgerechter Einbau sehr wichtig, sodass die Sensoren einen guten Kontakt zum Boden aufweisen. Luft einschließen, Steine oder Fremdmaterial können zu Verfälschungen der Messergebnisse oder Beschädigungen führen. Sie sollten daher in feuchten Böden installiert werden. Bei sehr trockenen, harten Böden ist ein Einbringen in den Boden hingegen deutlich erschwert beziehungsweise zum Teil nicht möglich.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile der beiden Messmethoden, wurde die Entscheidung getroffen, VWC-Messungen begleitet von Bodenanalysen durchzuführen. Während der zweijährigen Messkampagne wurde der VWC kontinuierlich mit HS-10 Sensoren (Decagon Devices, Pullman, USA) in 30 cm Bodentiefe gemessen. Bei der elektromagnetischen Messmethode wird die Bodenfeuchte indirekt über die sogenannte FDR-Methode (*Frequency Domain Reflectometry*) ermittelt. Zwei gabelförmig

angeordnete Messstäbe, die horizontal in den Boden eingebracht werden, senden kontinuierlich elektromagnetische Signale mit einer konstanten Frequenz und Amplitude aus. Der Widerstand des Bodens beeinflusst die Reflexion der ausgesendeten Sinuswellen, wodurch eine leicht veränderte Welle gegenüber dem Ausgangssignal erzeugt wird. Aus den Abweichungen im Frequenzbereich wird die relative Dielektrizitätszahl (Permissivität) des Bodens bestimmt und darüber der Wassergehalt berechnet.

Im ersten Versuchsjahr 2016 wurden pro Art/Sorte ein bis zwei Sensoren an einem mittig in der Pflanzreihe stehenden Individuum circa 40 cm entfernt vom Baumstamm in horizontaler Ausrichtung in den Oberboden eingesetzt. Im Falle von zwei Sensoren waren diese jeweils an der gegenüber liegenden Seite des Baumstammes eingesetzt worden und ihre Werte wurden gemittelt. Da sich der Bedarf nach Bodenfeuchtesensoren im zweiten Versuchsjahr 2017 verdoppelte, wurde pro Behandlungsvariante (Kap. 3.5) jeweils ein Sensor in beschriebener Weise eingebracht. Die Bodenfeuchtedaten wurden in denselben Messintervallen, wie die Klimavariablen, erfasst und für die weitere Datenanalyse gemittelt (Quartier A: CR800 und AM16/32 B multiplexer, Campbell Scientific, Logan, USA; Quartier B: Agilent 34970A Data Acquisition/Switch Unit, Agilent Technologies, Santa Clara, USA).

Zusätzlich zu den Messungen in 30 cm Tiefe wurde im zweiten Versuchsjahr ein tragbares Messgerät (UMP-1, Umwelt-Geräte-Technik (UGT), Müncheberg, Deutschland) zur Bestimmung des VWC in den obersten 10 cm des Bodens eingesetzt. Dies war notwendig, da es im Jahr 2017 zu hohen Ausfällen bei den kontinuierlich messenden HS-10 Sensoren kam. Ihr erneuter Einbau im sehr warmen und trockenen März war mit hohen Schwierigkeiten verbunden, da der Boden sehr hart und trocken war, und starke Bodenaustrocknung (Kap. 4.1.2) und damit einhergehende Bodenverdichtung in der Folgezeit schadeten den Sensoren zusätzlich.

Anders als beim FDR-Verfahren wird für die Ermittlung der Messwerte nicht eine Frequenzänderung, sondern eine Phasenverschiebung bzw. ein Zeitversatz zum Ursprungssignal betrachtet (UGT, 2019a). Mit dem kombinierten Bodenfeuchte-, Leitfähigkeits- und Temperatursensor erfolgten Punktmessungen in definierten

Abständen zu den Versuchsbäumen an vier ausgewählten Tagen (12. Juli, 31. Juli, 16. August und 7. September) im Sommer 2017 (Abb. 14). Die Punktmessungen wurden so arrangiert, dass die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte abgebildet werden konnte. Von Interesse war beispielsweise, ob sich die Bodenfeuchte im Wurzelbereich signifikant von der Bodenfeuchte in 1 m Entfernung unterschied.

Bevor die zwei 10 cm langen Edelstahlstäbe vertikal in den Boden geführt wurden, erfolgte jeweils eine Bodenpräparation mit einem Vorstecker, dessen Stäbe schmaler als die der Sonde waren. Dies ermöglichte Messungen auch bei sehr trockenem, hartem Boden. Die Datenaufzeichnung verlief direkt via Bluetooth mit einer dazugehörigen Smart-Phone App (Typ BT). Die Messergebnisse wurden verarbeitet und visualisiert mit der Hilfe von ArcGIS, Version 10.2.1 (2014; Esri, Redlands, USA). Für eine räumliche Interpolation der diskreten Werte wurden die Ergebnisse mehrerer in der Software verfügbarer Interpolationsverfahren verglichen. Das Verfahren der inversen Distanzwichtung wurde schließlich nach visueller Kontrolle als das geeignetste erachtet und verwendet.

### 3.7.2 Bodenart

Für eine grundlegende Charakterisierung der Bodeneigenschaften (Tabelle 3) wurden im Frühjahr 2018 Bodenproben in den zwei Quartieren entlang der ehemaligen Pflanzreihen der beiden Lindensorten entnommen. Pro Quartier erfolgten sechs Bohrkernentnahmen, deren Inhalt in den Laboren der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) in Freising mit Hilfe einer Korngrößenbestimmung weitergehend untersucht wurde.

Tabelle 3. Korngrößenverteilung und Bodenart in den Quartieren

Durchmesser [mm]	Grobsand	Mittelsand	Feinsand	Grobschluff	Mittelschluff	Feinschluff	Ton
	> 0,63-2	> 0,2-0,63	> 0,063-0,2	> 0,02-0,063	> 0,0063-0,02	> 0,002-0,0063	< 0,002
	%	%	%	%	%	%	%
<b>Probennummer</b>	<b>Quartier A, <i>Tilia cordata</i> 'Greenspire'</b>						
1	6,4	32,7	19,1	16,2	5,0	6,6	13,9
2	10,1	26,0	11,9	17,1	10,3	7,4	17,3
3	10,4	23,2	16,3	14,7	11,0	5,3	19,1
4	12,1	29,2	16,9	15,4	9,1	4,3	13,0
5	3,5	38,5	28,6	10,8	6,6	2,3	9,6
6	7,5	32,6	22,3	10,5	8,6	4,7	13,7
<b>M</b>	<b>8,3</b>	<b>30,4</b>	<b>19,2</b>	<b>14,1</b>	<b>8,4</b>	<b>5,1</b>	<b>14,4</b>
		<b>Sand</b>			<b>Schluff</b>		<b>Ton</b>
<b>Σ</b>		<b>57,9</b>			<b>27,7</b>		<b>14,4</b>
<b>Bodenart</b>	<b>mäßig sandiger Lehm (Ls3)</b>						
<b>Probennummer</b>	<b>Quartier B, <i>Tilia tomentosa</i> 'Brabant'</b>						
7	10,6	23,0	14,4	13,1	12,7	3,1	23,1
8	11,0	22,4	13,7	8,6	18,9	8,2	17,2
9	12,0	25,8	14,4	10,8	10,6	5,9	20,6
10	12,1	23,9	14,1	10,4	12,2	8,1	19,2
11	11,2	24,6	14,7	15,0	10,2	6,3	18,0
12	11,6	20,8	13,3	12,6	11,1	7,4	23,2
<b>M</b>	<b>11,4</b>	<b>23,4</b>	<b>14,1</b>	<b>11,7</b>	<b>12,6</b>	<b>6,5</b>	<b>20,2</b>
		<b>Sand</b>			<b>Schluff</b>		<b>Ton</b>
<b>Σ</b>		<b>48,9</b>			<b>30,8</b>		<b>20,2</b>
<b>Bodenart</b>	<b>stark lehmiger Sand (Sl4)</b>						

Dafür wurden die Bodenproben bei 60 °C zwei Wochen lang getrocknet und anschließend von Steinen befreit. Vor der eigentlichen Ermittlung der Körnung nach DIN 4022 durch Siebung und Sedimentation (DIN 19683 und DIN ISO 11277) musste der Boden behandelt werden, um ihn in einzelne Gesteinspartikel und Mineralkörner zerlegen zu können. Da das Carbonat Teilchen im Boden bindet, wurde durch die Zugabe von Salzsäure und unter Einfluss von Hitze die Bindekraft aufgehoben. Im nächsten Schritt erfolgte die Anteilsbestimmung der kleinsten Partikel (< 0,063 mm) durch Sedimentation. Mit einer KÖHN-Pipette wurden nach definierten Zeitabschnitten Proben genommen, diese im Anschluss getrocknet und deren Gewicht bestimmt. Um die größeren Teilchen zu trennen, wurden die Proben in Siebtürme mit fünf unterschiedlichen Maschengrößen gegeben, nass gesiebt und anschließend getrocknet und gewogen. Die ermittelten Werte wurden in ein vorgefertigtes Analyseprogramm übertragen und ausgewertet.

### **3.8 Baumparameter**

#### 3.8.1 Belaubung und Kronenstruktur

Aufgrund der Schlüsselrolle des Blattflächenindex (LAI;  $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) sowohl für die Verschattungs- auch für die Kühlleistung durch Transpiration (Kap. 2.2.1, 2.2.2) wurde dieser Parameter im Rahmen der Messungen aufgenommen. Für die bodengestützte Messung des LAI gibt es verschiedene direkte und indirekte Verfahren jeweils mit ihren Vor- und Nachteilen (Bréda 2003; Peper & McPherson, 2003; Jonckheere et al., 2004; Chianucci et al., 2015). Im Folgenden werden die bekanntesten Methoden vorgestellt.

#### *Direkte Messmethoden*

Bei der direkten Bestimmung des LAI handelt es sich häufig um eine destruktive Methode. Die Blätter müssen geerntet werden und ihre Blattfläche anschließend mit einem spezialisierten Messgerät oder durch Scannen und weitere Bildverarbeitung bestimmt werden. Durch Division der Summe aller Blattflächen mit der Kronenprojektionsfläche kann der LAI bestimmt werden.

Eine direkte, jedoch nicht destruktive Methode für die LAI-Messung bei Laubbäumen ist das Auffangen von abfallenden Blättern im Herbst mit Hilfe von Blattfallen, die unter den Baumkronen angebracht werden. Herausforderungen sind hier eine sinnvolle Anordnung und Anzahl zu wählen als auch Zersetzungsprozesse innerhalb der Fallen zu verhindern (Bréda, 2003). Anschließend werden die Blätter getrocknet und gewogen und dann mit der spezifischen Blattfläche ( $\text{m}^{-2} \text{g}^{-1}$ ) multipliziert. Der LAI ergibt sich schließlich aus der Summe der über den Herbst ermittelten Blattflächen. Da beide direkten Methoden sehr arbeits- und zeitintensiv, oft impraktikabel gleichzeitig aber auch sehr genau sind, werden sie am häufigsten für die Überprüfung von Messergebnissen mit komplexeren Verfahren genutzt (Chianucci et al., 2015).

#### *Indirekte Messmethoden*

Eine indirekte Methode zur Bestimmung des LAI ist die Nutzung allometrischer Gleichungen basierend auf dem Stammdurchmesser, der Splintholzfläche oder Kronenstrukturparametern (Nowak, 1996). Insbesondere bei Stadtbäumen, die in hohem Maße Pflegemaßnahmen unterliegen, indem sie beispielsweise zurückgeschnitten werden, und häufig Vitalitätsverluste aufweisen (Kap. 2.3.1), können allometrische Beziehungen jedoch schnell ihre Gültigkeit verlieren.

Aufgrund ihrer nicht-destruktiven, zeitsparenden und relativ einfachen Handhabung wird der LAI im Kontext der urbanen Stadtbaumforschung meist indirekt über optische Verfahren bestimmt (Peters et al., 2010; Moser et al., 2015; 2017; Rahman et al., 2015; 2018). Optische Verfahren leiten den LAI anhand von Messungen des Anteils der Strahlung, die durch das Blätterdach transmittiert wird, ab (*gap fraction analysis*). Sie basieren allesamt auf der Theorie des Lambert-Beer'schen Gesetzes, demnach die Menge der durch eine Baumkrone abgefangenen Strahlung von der Bestrahlungsstärke, der Kronenstruktur und optischen Eigenschaften abhängt.

Für die Bestimmung des LAI können unterschieden werden Messgeräte mit integrierten Strahlungssensoren (z.B. AccuPAR, Decagon Devices, Pullmann, USA; DEMON, CSIRO, Canberra, Australien; LAI-2000 beziehungsweise der Nachfolger LAI-2200, LICOR, Lincoln, USA; SunSCAN, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, USA) und Analysesysteme basierend auf digitaler hemisphärischer Farbfotographie (z.B.

HemiView, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, England; WinSCANOPY, Regent Instruments Inc., Quebec, Kanada).

Das Standardequipment für die hemisphärische Farbfotographie besteht zumeist aus einer digitalen Kamera, einem kalibrierten Fischaugenobjektiv und einer selbst nivellierenden Haltekonstruktion. Mit Hilfe des Fischaugenobjektivs werden Fotos mit einem Zenitwinkel von 180° aufgenommen und im Folgenden mit einem Schwellenwert der Pixelhelligkeit in Schwarz- und Weiß-Bilder umgewandelt (*thresholding*), um softwareintern zwischen Himmel und Baumkrone unterscheiden zu können.

Die Instrumente mit integrierten Strahlungssensoren messen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen und berücksichtigen entweder nur direkte oder diffuse Strahlung oder die Summe aus diffuser und direkter Strahlung (Globalstrahlung) (Jonckheere et al. 2004). Um den Anteil der transmittierten Strahlung erfassen zu können, sind dabei Aufnahmen unter der Baumkrone beziehungsweise dem Bestand in Kombination mit Referenzmessungen im offenen Gelände üblich. Dieser Aufwand muss bei den hemisphärischen Kamerasystemen nicht getätigt werden. Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Systemen ist, dass mit hemisphärischen Kameras getätigte Bilder permanent inspiziert werden können und somit vor Ort eine Qualitätskontrolle dieser stattfinden kann, während bei den Instrumenten mit integrierten Strahlungssensoren direkt nach der Messung LAI-Werte abgerufen werden können.

Egal um welches Analysesystem es sich handelt, müssen optische LAI-Messungen an Tagen mit einheitlicher Bewölkung oder nahe Sonnenaufgang oder -untergang durchgeführt werden. Weil die Systeme sensitiv gegenüber allen Licht abhaltenden Objekten in ihrem Blickfeld sind, und somit auch gegenüber Baumstämmen, Ästen oder künstlichen Körpern, handelt sich im engsten Sinne nicht um einen *Blattflächenindex*. Aus diesem Grund nennen Autoren und Hersteller auch häufiger die Bezeichnungen *foliage-*, *plant-*, *surface-* oder *vegetation area index* (Bréda, 2003; LI-COR, 2012, S. 21). Vergleichsprüfungen zwischen den verschiedenen Methoden zeigen außerdem, dass bei den indirekten optischen Verfahren der LAI im Vergleich zu direkten Messungen häufig unterschätzt wird. Das liegt vor allem daran, dass sich Blätter – entgegen der Grundannahme vieler Systeme – nicht zufällig im Raum verteilen, sondern häufig an einem Ort agglomerieren (engl. *leaf clumping*) (Bréda, 2003). Besonders bei Koniferen ist

das Fehlerpotenzial hoch, was von Herstellern teilweise auch eingeräumt wird (LI-COR, 2012, S. 88).

Anspruchsvoller als Aufnahmen in geschlossenen Baum- oder Getreidebeständen ist die Messung des LAI bei isoliert stehenden Bäumen, wie sie häufig in der Stadt anzutreffen sind. Im Vergleich zu einem homogenen Bestand muss je nach Messposition unterhalb der Baumkrone von sehr unterschiedlichen Kronenstrukturparametern und Belaubung ausgegangen werden. Außerdem befinden sich häufig freier Himmel oder Elemente städtischer Infrastruktur im Sichtfeld der Sensoren und Kameralinsen, was die Ergebnisse verfälschen kann. Aus diesem Grund wird die LAI-Messung bei isoliert stehenden Bäumen häufig gesondert thematisiert (Chianucci et al., 2015). Bei den Instrumenten mit integrierten Strahlungssensoren müssen spezielle Messprozeduren erfolgen (LI-COR, 2012), was den Bedienungsaufwand im Vergleich zu hemisphärischen Kameras deutlich erhöht.

Ungeachtet dessen wurde der LAI mit Hilfe des LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR Biosciences, Lincoln, USA) unter Verwendung der speziellen Prozedur zur Vermessung isoliert stehender Einzelbäume bestimmt. Die Sensoreinheit besteht aus fünf konzentrisch angeordneten ringförmigen Lichtsensoren (Detektorringe), wobei jeder Ring ein Teilbereich des durch die Linse fallenden Lichtes aus dem Gesamtblickwinkel des Sensors zwischen 0 und 74° erfasst, so dass fast ein hemisphärisches Sichtfeld abgedeckt wird (Abb. 10a). Die separaten Detektorinformationen werden mit dem Zenitwinkel gewichtet, was zu einer genaueren Auswertung führt. Je nach Größe der Baumkrone besteht die Möglichkeit, Daten nur von ausgewählten Detektorringen zu analysieren. Darüber hinaus kann auch das Sichtfeld des Rundobjektives eingeschränkt werden (Abb. 10b).

Der LAI wurde durch jeweils eine Messung unter freiem Himmel gefolgt von Messungen in allen vier Haupthimmelsrichtungen im Schattenbereich der jeweiligen Krone unter Verwendung eines auf 90° eingeschränkten Sichtfeldes des Rundobjektives ermittelt. Weil die Kronen der zu vermessenden Bäume so klein waren, wurden nur die Daten der innersten zwei bis drei Detektorringe des optischen Sensors verwendet, um sicher zu gehen, dass nur Bereiche der Baumkrone im Sichtfeld des Sensors lagen. Im ersten

Versuchsjahr 2016 wurden LAI-Werte einmalig Mitte August, im zweiten Jahr 2017 Mitte Juni und Mitte August erfasst. Die Datenaufnahme erfolgte nur bei einheitlich bewölktem Himmel oder kurz vor Sonnenuntergang.

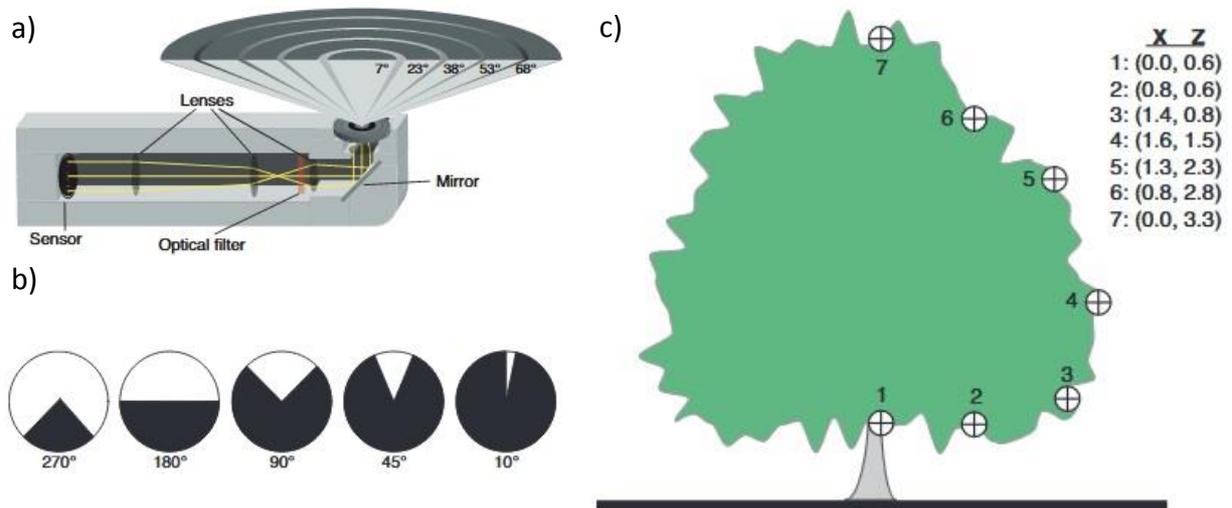


Abbildung 10. Messprinzip des LAI-2000 aus LI-COR (2012, S. 1-2, 1-6, 5-18)

Zur weiteren Analyse der Daten mit der firmeneigenen Software FV2200 mussten außerdem die Dimensionen der Baumkronen mit einer ausreichenden Anzahl an Koordinaten beschrieben werden. Mit Hilfe einer Leiter und eines Meterstabes wurden für jeden Baum vor den optischen Messungen sieben bis zehn Koordinaten vom Kronenansatz bis zur Kronenspitze erfasst, die in ausreichendem Maße seine Form beschreiben sollten (Abb. 10c). Diese so genannten x, z Paare, welche den Kronenradius auf einer bestimmten Höhe wiedergeben, wurden dann gemeinsam mit den Transmissionsmessungen zur Berechnung des LAI verwendet. Darüber hinaus ist es in der Software auch möglich, über die gewonnenen x, z Paare Kronenstrukturparameter, wie die Kronenprojektionsfläche oder das Kronenvolumen zu berechnen, was einen großen Mehrwert im Vergleich zu Messungen mit hemisphärischen Kameras darstellt.

### 3.8.2 Frühjahrs- und Herbstphänologie

Der Start der Blattentwicklung im Frühjahr und das Einsetzen der Vegetationsruhe im Herbst entscheiden über die Höhe der Kühlleistung in diesen zwei Jahreszeiten. So kann beispielsweise bei warmem Wetter im Frühling die Transpirationsleistung weit unterhalb der potentiellen Verdunstung liegen, da die Blätter noch nicht ausgetrieben sind oder sich gerade erst im Austrieb befinden (Bréda & Granier, 1996, S. 525). Darüber hinaus kann durch einen trockenheitsbedingten frühzeitigen Blattfall im Sommer oder Herbst die Kühlleistung stark reduziert sein. In erster Linie ist ein frühzeitiger Blattfall jedoch ein entscheidender Indikator für die Vitalität und somit die Fähigkeit einer Baumart oder Sorte, mit Trockenheit zurechtzukommen, der aber natürlich den Verlust von zahlreichen Ökosystemleistungen mit sich bringt.

Nach Schirmer et al. (1987, S. 296) ist die Phänologie „die Lehre vom Einfluss des Wetters, der Witterung und des Klimas auf den jahreszeitlichen Entwicklungsgang und die Wachstumsphasen der Pflanzen und Tiere (...).“ Mit dem Ziel einer einheitlichen Beschreibung der Entwicklungsstadien von Pflanzen nach phänologischen Merkmalen und deren Codierung wurde die sogenannte BBCH-Skala entwickelt. Die Kurzbezeichnung leitet sich ab von den Institutionen, die diese Skala gemeinsam entwickelt haben, nämlich die **B**iologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, das **B**undessortenamt und die **CH**emische Industrie. Während für agrar- und forstwirtschaftlich relevante Arten individuelle Skalen vorliegen, kann für weniger erforschte Arten auf eine allgemeine Skala zurückgegriffen werden. Dabei ist der gesamte Entwicklungszyklus der Pflanzen mit Ziffern in aufsteigender Reihenfolge von 0 bis 9 in zehn überschaubare und deutlich voneinander abgrenzbare längere Entwicklungsphasen, die Makrostadien unterteilt (Hack et al., 1992, S. 266). Die Codierung von kurzen Entwicklungsschritten (Hack et al., 1992, S. 267), den Mikrostadien, erfolgt ebenfalls mit Codierungen von 0 bis 9.

Auf Ebene der Mikrostadien wurden innerhalb der Makrostadien *0 Keimung/Austrieb*, *1 Blattentwicklung* und *9 Eintreten der Vegetationsruhe* die Eintrittszeitpunkte der phänologischen Stadien im Frühjahr und Herbst codiert. Für die Beurteilung wurde die allgemeine BBCH-Skala für perennierende Pflanzen in leicht abgeänderter Form zum Original verwendet (Tabelle 4).

Alle phänologischen Stadien, vom Beginn des Knospenschwellens (BBCH 01) bis zum Ende des Blattaustriebes (BBCH 19) im Frühjahr als auch vom Beginn der Herbstfärbung (BBCH 93) bis zum Eintreten der Vegetationsruhe (BBCH 97) im Herbst, wurden für die sechs Arten und Sorten erfasst. Ein- bis zweimal wöchentlich zwischen Ende März und Mitte Mai beziehungsweise zwischen Anfang Oktober und Ende November wurden die Codierungen vorgenommen. Ein BBCH-Code wurde immer dann zugeteilt, wenn mehr als 2/3 der Krone sich in dem jeweiligen Entwicklungsstadium befanden. Aufgrund der starken Bodenaustrocknung im Rahmen des Regenausschlussexperimentes (Kap. 3.5) und damit verbundener Vitalitätsverluste bei einigen Bäumen, wurden auffallend frühe Blattverfärbungen oder Blattfall auch während der Sommermonate festgehalten.

Tabelle 4. BBCH-Skala zur Beschreibung phänologischer Entwicklungsstadien perennierender Pflanzen verändert nach Hack et al. (1992, S. 266ff.). Mikrostadien, die von der allgemeinen BBCH-Skala abweichen, sind mit <sup>m</sup> gekennzeichnet.

Mikrostadium	Makrostadium	BBCH-Code
<b>0 Keimung/Austrieb</b>		
0	Winter- beziehungsweise Vegetationsruhe	00
1	Beginn des Knospenschwellens	01
7	Beginn des Knospenaustriebes	07
9	Knospen zeigen grüne Spitzen	09
<b>1 Blattentwicklung</b>		
0	erste Blätter spreizen sich ab	10
1	erste Blätter entfaltet	11
5 <sup>m</sup>	Blätter sind entfaltet haben aber ihre art-/sortentypische Größe noch nicht erreicht	15 <sup>m</sup>
9 <sup>m</sup>	erste Blätter haben art-/sortentypische Größe erreicht	19 <sup>m</sup>
<b>9 Eintreten der Vegetationsruhe</b>		
3	Beginn der Blattverfärbung oder des Blattfalles	93
5	50 % der Blätter verfärbt oder abgefallen	95
9	Ende des Blattfalles - Pflanze in Winter- beziehungsweise Vegetationsruhe	97

Für die Berechnung von klimatischen Signalen, die bekanntermaßen einen Einfluss auf die phänologischen Eintrittstermine haben, wurde der übliche Schwellenwert von 5 °C

(Schuster et al., 2014; Zohner & Renner, 2014) verwendet. Die notwendige Höhe der Frühjahrstemperaturen um den Knospenaufbruch einzuleiten wurden wiedergegeben als akkumulierte Wärmesumme aller Tagesmitteltemperaturen  $> 5\text{ °C}$  vom 01. Januar des beobachteten Jahres bis zum art-/sortenspezifischen Beginn des Knospenaustriebes (BBCH 07). Der winterliche Kältereiz, welcher für die Beendigung der Winterruhe notwendig ist, wurde ausgedrückt als Summe der Tage mit einer mittleren Temperatur  $\leq 5\text{ °C}$  (engl. *chill days*) zwischen dem Eintreten der Vegetationsruhe (BBCH 97) im Vorjahr und dem Beginn des Knospenaustriebes (BBCH 07) im darauffolgenden Jahr.

### 3.8.3 Xylemflussmessungen

Der Wasserverbrauch von Stadtbäumen ist von hoher Relevanz bezüglich Fragen des urbanen Wassermanagements und der Trockenheitstoleranz von Arten und Sorten und eine bedeutende Größe zur Berechnung der Kühlleistung durch Transpiration (Kap. 2.2.2). Bislang gibt es allerdings nur eine geringe Datengrundlage. Das liegt daran, dass Messungen des Wasserverbrauches von Stadtbäumen mit zahlreichen Herausforderungen und Unsicherheiten verbunden sind. Abseits der technischen Herausforderungen betrifft dies zum Beispiel die Auswahl einer ausreichenden Anzahl von Individuen unter vergleichbaren Standortverhältnissen. Bei Messungen in öffentlich zugänglichen urbanen Räumen müssen außerdem das dazugehörige Messequipment gut vor Vandalismus und Diebstahl geschützt werden und Genehmigungen zur Platzierung der Datenlogger und zur Anbringung etwaiger invasiver Messsensoren und vorgelagerten Bohrkernentnahmen eingeholt werden. Hohe Anschaffungskosten und eine komplizierte Handhabung sind weitere Gründe, warum die Datengrundlage für den Wasserverbrauch von Stadtbäumen sehr gering ist.

Zur Messung des Wasserverbrauches von Stadtbäumen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Die direkteste Methode ist die gravimetrische Bestimmung durch kontinuierliches oder wiederholtes Wiegen (z.B. Uehre & Herrmann, 2017). Dafür können handelsübliche Waagen und Ringkraftmesser verwendet werden oder Lysimeter, die detaillierte Informationen zu Wasserhaushaltsparametern liefern (Goss & Ehlers, 2009). Lysimeter können im Labor oder im Freiland eingesetzt werden. Sie eignen sich für kleine Bäume oder für niederwüchsiger Vegetationsformen. Für diese Pflanzen mit

niedrigem Gewicht kann eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden, die mit zunehmender Pflanzengröße jedoch abnimmt. Bei Feldlysimetern nimmt auch die Windanfälligkeit der Messtechnik mit der Größe der Pflanze zu. Für ausgewachsene Stadtbäume im Gelände ist diese Methode daher nicht durchführbar. Die Kosten für Baum-Lysimeter sind – insbesondere aufgrund der erforderlichen Installationsarbeiten – sehr hoch.

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung des Wasserverbrauches von Bäumen ist die Verwendung von Blatt-Porometern und Gaswechsellmesssystemen (z.B. Fini et al., 2009; McCarthy et al., 2011; Rahman et al., 2015; Gillner et al., 2015a; 2015b). Mit den mobilen Messgeräten können die Photosynthese, die Wasserdampf-abgabe und/oder die stomatare Leitfähigkeit ( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) von einzelnen Blättern quantifiziert werden. Die Messungen erfolgen exemplarisch an vollentfalteten, sonnenexponierten Blättern und können im Anschluss auf die gesamte Baumkrone hochgerechnet werden, sofern der Gesamtwasserverbrauch eines Baumes von Interesse ist. Dieser Schritt bedarf Kenntnissen über die Gesamtblattfläche des jeweiligen Baumes und stellt somit einen zusätzlichen Messaufwand und eine große Fehlerquelle dar, da die Bestimmung der Blattfläche zumeist auch nur indirekt ermittelt wird und Unsicherheiten mit sich bringt (vgl. Kap. 3.8.1). Darüber hinaus muss berücksichtigt werden, dass sonnenexponierte Blätter einen anderen Wasserverbrauch aufweisen als Schattenblätter (Konarska et al., 2016). Zuletzt wird in den zumeist geschlossenen Messkammern, in denen die Luft stark zirkuliert wird, um Wasserdampf-Konzentrationsgradienten zu minimieren, die Grenzschicht der Blätter zerstört, was einen Einfluss auf den Wasserverbrauch hat.

Wasser wird stammaufwärts im Xylem transportiert, abwärts im Phloem und radial zwischen Xylem und Phloem und ist in beiden Stammbereichen gespeichert (Steppe et al., 2015, S. 335f.). Steht der Gesamtwasserverbrauch von Baumarten und Sorten im Zentrum des Interesses, wird dieser häufig auf Stammbasis gemessen (z.B. Bush et al., 2008; McCarthy et al., 2011; Pataki et al., 2011; Rahman et al., 2017a; 2017b; 2018; 2019). Dabei muss bei allen Messverfahren berücksichtigt werden, dass dieser über den Stammquerschnitt nicht homogen verteilt ist. In einer Studie mit sieben Waldbaumarten (Gebauer et al., 2008) wurde beispielsweise gezeigt, dass innerhalb der ersten 4 cm unterhalb des Kambiums, im Bereich der jüngsten Jahrringe, der Xylemfluss, also das

im Xylem transportierte Wasser, die höchsten Werte erreicht. Bei *Fagus sylvatica* und *Fraxinus excelsior* nahm der Xylemfluss nach diesem Maximum im jüngsten Jahrringbereich exponentiell und kontinuierlich ins Stamminnere ab, während das radiale Profil bei *Acer campestre*, *A. pseudoplatanus*, *Carpinus betulus* und *Tilia spec.* einen buckelförmigen Verlauf mit Maximalwerten bei 2-4 cm unterhalb des Kambiums zeigte. Rahman et al. (2017b) ermittelten an ausgewachsenen Winter-Linden in München einen Anstieg der Xylemflussdichte bis zum mittleren Bereich des Xylems gefolgt von einem steilen Rückgang bis hin zur Kern- beziehungsweise Reifholzzone. Unterschiede wurden auch zwischen Angiospermen und Gymnospermen ausgemacht (Pataki et al., 2011). Die artspezifischen Radialprofile entlang des Stammquerschnittes können also sehr unterschiedlich ausfallen und müssen bei der Interpretation von Xylemflusswerten berücksichtigt werden beziehungsweise stellen eine potenzielle Fehlerquelle dar. Bei Bäumen mit großen Stammdimensionen können sie beispielsweise ermittelt werden, indem in unterschiedlichen Tiefen Sensoren eingebracht werden (Rahman et al., 2017a; 2017b) oder indem radiale Trends aus der Literatur entnommen werden (Pataki et al., 2011).

Für die Bestimmung des Xylemflusses gibt es zahlreiche unterschiedliche Verfahren, welche sich hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen unterscheiden. Eine vollständige Übersicht ist zu finden bei Matyssek & Herppich (2017).

Eine nicht-invasive, aber relativ kostspielige Messmethode sind die **Dynagage Safflussmanschetten** (Dynamax, Houston, USA). Bei konstanter Wärmezufuhr durch eine Heizfolie werden die Temperatur innerhalb (radialer Wärmefluss), unter- und oberhalb der Heizmanschette erfasst. Die Methode eignet sich nur für Durchmesser bis zu 12,5 cm, weil der gesamte Stammquerschnitt gleichmäßig aufgewärmt werden muss. Somit wird sie hauptsächlich in den Agrarwissenschaften und dem Gartenbau angewendet. Wissenschaftliche Begleitstudien sind seltener als bei anderen thermischen Verfahren. Bei diesen wird der Massenfluss zumeist durch Wärmezufuhr in das eine Heizsonde umgebende beziehungsweise daran angrenzende Xylem erfasst. Die Temperaturänderung durch das vorbeifließende Wasser oder die Energie zur

Aufrechterhaltung einer bestimmten Temperaturdifferenz wird gemessen und darüber der Xylemfluss bestimmt.

Die **Wärmeausbreitungsmethode** nach **Granier** (engl. *thermal dissipation probe*; Granier, 1985) ist das in den Forstwissenschaften und der Stadtbaumforschung momentan am häufigsten verwendete thermische Verfahren. Die Sensoren bestehen aus zwei üblicherweise 2 cm langen Nadeln, die mit Kupfer-Konstantan-Thermoelementen versehen sind. Sie werden horizontal in das Xylem installiert, wobei die obere Nadel zusätzlich noch mit einer Heizelektrode versehen ist und somit als Heiznadel fungiert. Ausgehend von einer konstanten lokalen Erwärmung durch die Heiznadel wird die Ausbreitung der Wärme mit Hilfe der Temperatursensoren aufgezeichnet. Durch den Xylemfluss verändert sich die Temperaturdifferenz zwischen der beheizten und der unbeheizten Nadel und dient somit als Berechnungsgrundlage für den Wasserverbrauch, der über empirische Formeln ermittelt werden kann. Ein Nachteil ist, dass sich innerhalb der Nadeln jeweils nur ein Messpunkt befindet und sie mit ihren 2 cm Länge bei großen Bäumen somit nur einen kleinen Teil des Xylems messen. Insbesondere wegen der hohen Variabilität der Radialprofile ist somit die Integration des Xylemflusses über das gesamte Xylem mit sehr hohen Unsicherheiten verbunden. Wird ein Sensor zu weit außen im Xylem platziert, kommt es zu einer Überschätzung des Gesamtwasserverbrauches eines Baumes, wird ein Sensor hingegen zu tief eingebracht, wird der Gesamtwasserverbrauch unterschätzt (Čermák et al., 2004). Aus diesem Grund müssen weitere Sensoren in unterschiedlichen Tiefen des radialen Profils eingebracht werden (siehe oben). Eine inhomogene Wasserleitung ergibt sich auch an Stellen, an denen sich ehemals ein Ast befunden hat, was von außen bei der Installation nicht mehr sichtbar ist.

Das Messprinzip basiert auf der Annahme, dass es bei nicht fließendem Xylemwasser (Flussstillstand, z.B. nachts) zu einer maximalen Temperaturdifferenz zwischen den beiden Sensornadeln kommt. Dieser Referenzwert ist notwendig, um den Xylemfluss über empirische Formeln zu berechnen. Nach Granier wird dieser Nullpunkt für jede Nacht neu definiert. Da allerdings auch innerhalb der Nacht Bäume Wasser aufnehmen können und Wasser innerhalb des Stammes fließen kann, erzeugen die Sensoren kein echtes Nullsignal. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, dass innerhalb eines definierten Beobachtungszeitraumes (z.B. ein Jahr) ein absolutes Maximum von der

Temperaturdifferenz für einen Flusstillstand festgelegt wird (Matyssek & Herppich, 2017, S. 9). Dieser absolute Flusstillstand tritt nur sehr selten auf in Nächten, in denen die Bäume mit Wasser gesättigt sind und eine sehr hohe beziehungsweise maximale Luftfeuchtigkeit herrscht. Darüber hinaus ändert sich mit der Zeit die Wärmeleitfähigkeit an der Einstichstelle der Sensoren. Der echte Nullpunkt ist somit schwierig feststellbar. Über die Festlegung des Nullpunktes herrscht eine rege Kontroverse.

Deutlich kostspieliger aber auch genauer ist die **Wärmefelddeformationsmethode** (engl. *heat field deformation method*; Nadezhdina et al., 2012), mit Hilfe derer axiale und tangentielle Temperaturänderungen im Wärmefeld einer konstant energiezuführenden nadelförmigen Wärmequelle erfasst werden. Drei ebenfalls nadelförmige Temperatursensoren mit mehreren Messpunkten bilden das radial verlaufende Xylemflussprofil, die hydraulische „Landkarte“ der Baumarchitektur (UGT, 2019b), ab. Auch sehr niedriger Xylemfluss, z.B. während der nächtlichen Wiederauffüllung, und rückwärts gerichtete Ströme sind messbar. Darüber hinaus liefert die Methode ein elektrisches Nullsignal bei Flusstillstand. Die Technik wird bislang noch als semiempirisch eingestuft (Matyssek & Herppich, 2017, S. 15).

Beim **Wärmequotientverfahren** (engl. *heat ratio method*) wird die Fließgeschwindigkeit des pflanzlichen Xylemwassers über die Ausbreitung von kurzen Wärmeimpulsen bestimmt. Die Messvorrichtung besteht aus drei Nadeln. Die zentral gelegene ist eine auf ihrer gesamten Länge beheizte Wärmequelle. Die beiden anderen Nadeln dienen der Temperaturmessung, jeweils bestückt mit zwei Thermistoren. Aus dem Verhältnis der zu diesen symmetrisch angeordneten Temperatursensoren transportierten Wärmemenge infolge der Wärmepulsapplikation können Betrag und Richtung des Xylemflusses bestimmt werden. Die Vorteile sind dieselben wie bei der Wärmefelddeformationsmethode (Matyssek & Herppich, 2017, S. 15). Bei beiden Methoden steht die Untersuchung radialer Flussprofile im Vordergrund; sie werden häufig kombiniert eingesetzt.

Alle genannten Techniken zur Messung des Xylemflusses sind mit einem relativ hohen technischen und Wartungsaufwand verbunden und müssen unter Berücksichtigung dessen angewandt werden, dass der Xylemfluss inhomogen über den

Stammquerschnitt verteilt ist. Außerdem wird die thermische Messung des Wassertransportes dadurch verfälscht, dass das aufwärts fließende Wasser einen natürlichen Temperaturgradienten aufweist, der je nach Sonneneinstrahlung und weiteren Umwelteinflüssen variiert. Aufgrund der Möglichkeit der Erfassung des Gesamtwasserverbrauches von Bäumen, den im Vergleich zu anderen thermischen Verfahren relativ geringen Kosten und der Anwendungsfreundlichkeit, wurde der Wasserverbrauch durch eine kontinuierliche Messung der Xylemflussdichte ( $\text{g H}_2\text{O m}^{-2} \text{min}^{-1}$ ;  $J_S$ ) mit Hilfe des Granier-Verfahrens erfasst.

Die 2 cm langen Nadeln wurden an den Nordseiten der Baumstämme auf einer Höhe von etwa 1,5 m und einem vertikalen Abstand von 8 cm in die äußersten 2 cm des Stammxylems eingebracht und die obere Nadel anschließend durch eine konstante Stromquelle beheizt (SF-G und CCS, Ecomatik, Dachau, Deutschland). Der Abstand war notwendig, um thermische Beeinträchtigungen durch die Wärme der beheizten oberen Sensornadel zu vermeiden. Alle Xylemflusssensoren wurden mit Hilfe reflektierender Isolationsschilde geschützt um die Messungen von externen Strahlungs- und Temperatureinflüssen zu schützen.

Die Spannungs-Differenz zwischen den beiden Sensornadeln ist proportional zu der Temperatur, welche sich bei zunehmendem Wasserdurchsatz verringert, da die Wärme sich schneller verteilt. Granier's empirische Formel (1985) wurde verwendet, um Spannungswerte in volumetrische Xylemflussdichten zu übersetzen:

$$J_S = 0,714 T \left[ \frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right]^{1,231}$$

$\Delta T$  ist dabei die Temperaturdifferenz zwischen den Sensornadeln und  $\Delta T_{max}$  die maximale Temperaturdifferenz innerhalb eines 24-Stunden Intervalls, für welche kein Xylemfluss angenommen wird.  $\Delta T_{max}$  wurde für einen Vergleich außerdem auch als absolutes Maximum der Temperaturdifferenz für den gesamten Untersuchungszeitraum 2016 beziehungsweise 2017 definiert, um die Resultate auf Basis unterschiedlicher Nullwerte vergleichen zu können.

Die Daten wurden in derselben Taktung aufgezeichnet und an denselben Dataloggern gespeichert wie die VWC-Werte (Kap. 3.7.1). Im ersten Versuchsjahr wurde der Xylemfluss von Juni bis einschließlich September gemessen, im zweiten Versuchsjahr

erstreckten sich die Messungen über die gesamte Vegetationsperiode. Die Anzahl der Sensoren pro Art/Sorte schwankte im ersten Versuchsjahr zwischen zwei und sechs Stück, pro Art/Sorte und Behandlungsvariante im zweiten Versuchsjahr zwischen zwei und vier (Linden) Stück. Der Unterschied in der Anzahl lag zum einen an den hohen Anschaffungskosten und zum anderen an der hohen Anfälligkeit der Sensoren. Hohe Windlasten sowie das Einwachsen der Sensoren bei den Ahornen führten zu Ausfällen und mehrfachem Reparaturbedarf.

Im Falle von Datenlücken, welche infolge von Geräteausfällen oder einer unterbrochenen Stromversorgung entstanden sind, wurde der starke Einfluss des Sättigungsdefizites der Luft (VPD) auf den Wasserverbrauch von Bäumen (Oren et al., 1998; Bush et al., 2008; Peters et al., 2010; Pataki et al., 2011) für die Berechnung der Xylemflussdichte ( $J_s$ ) genutzt (siehe Kap. 3.9).

Durch Multiplikation von  $J_s$  mit der gesamten Splintholzfläche ( $\text{cm}^2$ ;  $A_s$ ) auf 1,5 m (2016) beziehungsweise 1,8 m (2017) Stammhöhe lässt sich der gesamte Wasserfluss pro Baum berechnen ( $\text{l min}^{-1}$ ; SF):

$$SF = J_s A_s$$

Zur Bestimmung der Splintholzquerschnittsfläche wurde vor der Installation der Messgeräte im Sommer 2016 mit einem 4,3-mm Hohlbohrer pro Art beziehungsweise Sorte ein nicht für den Versuch vorgesehener Baum aus demselben Quartier mit vergleichbarem Stammumfang auf 1 m Höhe angebohrt. Anschließend wurden die Stammbohrkerne hinsichtlich der Ausmaße des hydroaktiven Xylems im Stammquerschnitt visuell inspiziert. Für keinen untersuchten Baum konnte eine Unterscheidung zwischen dem erfahrungsgemäß helleren Splintholz und dem dunkler gefärbten Kernholz getroffen werden und somit wurde angenommen, dass bei diesen jungen Bäumen noch keine Verholzung stattgefunden hat. Aufgrund der geringen Durchmesser der Bäume (Tabelle 2) ergab sich auch nicht die Notwendigkeit beziehungsweise Möglichkeit, Radialprofile durch das Einbringen von Sensoren in unterschiedlichen Tiefen des Xylems zu erstellen. Der gesamte Stammquerschnitt wurde somit als gleichmäßig hydroaktiv angenommen.

Um die Messwerte von Bäumen mit unterschiedlichen Kronendimensionen vergleichbar machen zu können, wurden zusätzlich auch Quotienten aus den SF-Tagessummen und der Kronenprojektionsfläche ( $l \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ;  $E_C$ ) gebildet (Peters et al., 2010). Die Kronenprojektionsfläche ( $\text{m}^2$ ;  $A_C$ ) wurde mittels der maximalen Kronenbreite, welche im Zuge der Messung der x, z Paare für jeden Baum erfasst wurde (Kap. 3.8.1), berechnet.

$$E_C = J_s \frac{A_s}{A_C}$$

Art- und sortenspezifischen Variationen in der Belaubung wurde schließlich durch die Berechnung des Wasserverbrauches pro Einheit Blattfläche Rechnung getragen ( $l \text{ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ;  $E_L$ ), ebenfalls angelehnt an Peters et al. (2010):

$$E_L = \frac{E_C}{LAI}$$

Eine Skalierung der Werte des Wasserverbrauches wurde ausschließlich für das Jahr 2016 vorgenommen, da in diesem Jahr mehr Bäume pro Art beziehungsweise Sorte unter gleichen Umweltbedingungen gemessen wurden, als im Folgejahr (siehe Kap. 3.5), indem ausreichend Versuchsbäume und Messequipment für zwei Behandlungsvarianten (Kontrolle und trocken) zur Verfügung stehen mussten.

### 3.8.4 Stammzuwachs und tageszeitliche Dickenschwankungen

Verschattung und Kühlleistung durch Transpiration korrelieren unter anderem mit der Wuchshöhe und somit auch dem Durchmesserwachstum von Bäumen (siehe Kap. 2.2.1, 2.2.2). Für Bäume am Extremstandort Straße sind Wuchsminderungen aufgrund von Trockenheit jedoch nicht zwangsläufig als Nachteil zu verstehen, denn wichtiger als der Zuwachs ist hier die Robustheit der verwendeten Arten und Sorten. Das Durchmesserwachstum sowie die Wassernutzungseffizienz werden in dieser Dissertation insbesondere deshalb betrachtet, weil es sich um integrierende Größen handelt, in denen sich zahlreiche Aspekte der Physiologie, die Wasser- und Kohlenstoffdynamiken, manifestieren (Steppe et al., 2015) und Informationen über art- und sortenspezifische Strategien unter Trockenheit gewonnen werden können (Lösch, 2001, S. 413).

Insbesondere kontinuierlich messende Instrumente, die sogenannten Dendrometer, zeigen die Reaktion von Pflanzen gegenüber ihrer Umwelt in hoher zeitlicher Auflösung

und erlauben somit tiefergehende Analysen von Kausalzusammenhängen. Neben Informationen zum Einfluss von Umweltfaktoren auf das Pflanzenwachstum, beinhalten Dendrometerdaten auch Informationen über den Wasserstatus einer Pflanze – ihrem Wassergehalt und der internen Wasserspeicherung. Der ausgeprägte Tagesgang infolge der Nutzung stammintern gespeicherten Wassers (siehe Kap. 2.3.3, *kurzfristige Anpassungen*) kann damit detailliert abgebildet werden.

Dendrometer gibt es für viele unterschiedliche Anwendungen, wie beispielsweise zur Messung des Wasserverlustes von Obst und Gemüse, Dendrometer für Wurzelanalysen oder Unterwasserpflanzen, Radius-, Durchmesser und Umfangsdendrometer und vertikal messende Dendrometer für Messungen an Baumstämmen. Die maximale Auflösung beträgt im Moment 2  $\mu\text{m}$ . Aufgrund des hohen Informationsgehaltes wird angeregt, Dendrometerdaten als Ergänzung oder sogar als Ersatz für Xylemflusssensoren einzusetzen (Herzog et al., 1995). Allerdings sind Dendrometer im Moment auch häufig kostspieliger als Xylemflusssensoren. Darüber hinaus liegen noch keine Erkenntnisse darüber vor, inwieweit eine temperaturabhängige Ausdehnung des Stammgewebes einen Beitrag zu den Dickenschwankungen leistet. Informationen gibt es bezüglich der Ausdehnungskoeffizienten von totem Holz, jedoch nicht von lebendem.

Für die Vegetationsperioden der zwei Versuchsjahre wurden zu Beginn jeden Monats die Stammzuwächse mit Hilfe eines digitalen Messschiebers auf 1 m Höhe erfasst. Um Unregelmäßigkeiten in der Stammform gerecht zu werden, wurden pro Baum zwei zueinander orthogonale Messungen durchgeführt (Nord-Süd und Ost-West) und anschließend gemittelt. Die Wahl der Messhöhe von 1 m erfolgte gemäß der gängigen Baumschulpraxis, anders als bei der klassischen Messung des Brusthöhendurchmessers auf einer Höhe von 1,30 m.

Für die Arten und Sorten wurde sowohl das absolute als auch das relative Stammwachstum berechnet, wobei im Ergebnisteil der Fokus auf das relative Wachstum gelegt wurde. Bei der Analyse des relativen Wachstums wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die untersuchten Arten und Sorten zu Beginn der Messungen unterschiedlich große Stammdurchmesser aufwiesen, was einen Einfluss auf die

Biomasse Produktion hat (Prado-Junior et al., 2016). Außerdem können Wachstumsverläufe im Jahr besser analysiert werden.

Für eine kontinuierliche Ermittlung der Wuchsdynamik und der Abbildung tageszeitlicher Dickenschwankungen unter Trockenstress wurden im Frühjahr 2017 zusätzlich an elf Individuen des Linden-Vergleichspaares elektronische Dendrometer (DD-L, Ecomatik, Dachau, Deutschland) auf 1,30 m Stammhöhe installiert. Die hohen Anschaffungskosten erlaubten keine Bemessung aller Arten und Sorten im Versuch. Die Installation eines weiteren Dendrometers an einer Brabanter Silber-Linde in der Trockenvariante erfolgte nachträglich in der zweiten Junihälfte, da das Verbindungskabel für den Anschluss an den Datenlogger zu kurz war und verlängert werden musste. Aufgrund der hohen Bedeutung von Linden als Straßenbäume in München (Kap. 3.3) fiel die Wahl für die Anbringung der Sensoren auf diese Gattung. Die Datenerfassung erfolgte mit demselben Equipment und innerhalb derselben Zeitintervalle wie bei den kontinuierlich messenden Bodenwassergehalts- und Xylemflusssensoren (Kap. 3.7.1, 3.8.3).

### 3.8.5 Wurzelmasse, Wurzel-Spross-Verhältnis und Wurzelarchitektur

Trotz ihres sehr hohen Erklärungspotenzials hinsichtlich Fragen zur Trockenheitstoleranz von Bäumen (Kap. 2.3.3), gibt es bislang nur wenige Wurzeluntersuchungen an Stadtbäumen (Kap. 2.3.1). Das liegt vor allem daran, dass es für Analysen, abseits einer destruktiven Rodung und nachfolgender Wurzelanalyse, nur wenige verfügbare Techniken gibt. Und selbst Rodungen zugunsten des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns sind aufgrund der zahlreichen Nutzungsansprüche an Stadtbäume schwierig durchzusetzen und erfordern die Erlaubnis der kommunalen Verwaltungen. In Baumschulen sind Wurzeluntersuchungen aufgrund der regelmäßigen Rodung beziehungsweise Verschulung jedoch leichter durchzuführen (siehe z.B. Taeger, 2017).

Sollen Wurzelsysteme zerstörungsfrei untersucht werden, stellt ihre Freilegung eine Möglichkeit dar (Reichwein, 2002). Diese Methode ist allerdings mit erheblichem Aufwand verbunden und bedeutet einen großen Eingriff in die städtische Infrastruktur. Sollen die Maßnahmen keiner Rodung gleichkommen, können die Wurzelsysteme außerdem nie in ihrer Gesamtheit untersucht werden. Eine weitere Möglichkeit,

Einblicke in die verborgene unterirdische Biomasse zu erhalten, stellen Bohrkernentnahmen dar. Sie können Anwendung finden, sofern zumindest ein Teil der Oberfläche um die Baumscheibe oder den Pflanzstreifen unversiegelt ist. Mit Hilfe dieses Ansatzes und nachfolgenden Labor- oder Trockengewichtsanalysen können Informationen über die Feinwurzelverteilung und -produktion von unterschiedlichen Arten und Sorten generiert werden (Rahman et al., 2019; Zhang et al., 2019). Die Methode ist minimal-invasiv und günstig, allerdings auch sehr arbeitsaufwändig. Deutlich weniger Arbeitsaufwand bei der Datenerfassung erfordern nichtinvasive Messungen mit einem Bodenradar. Die Methode zur Charakterisierung des Untergrundes mit hochfrequenten elektromagnetischen Wellen, welche häufig für geophysikalische Fragestellungen angewendet wird, wird auch schon längere Zeit in der Forstwissenschaft für die Bestimmung der Grobwurzelbiomasse und ihrer räumlichen Verteilung genutzt. Die Nützlichkeit der Methode hat sich hier als stark standortabhängig erwiesen: sehr gute Ergebnisse konnten in sandigen, ausgetrockneten Böden erzielt werden, wohingegen bei Böden mit hohem Bodenwasser- oder Tongehalten die Auflösung und die erfassbare Bodentiefe deutlich sank (Butnor et al., 2001). Darüber hinaus wurde herausgefunden, dass das Bodenradar besser auf räumlich weit auseinanderliegende Wurzeln mit großen Durchmessern und hohem Wassergehalten reagiert und es somit zu einer Unterschätzung der gesamten Wurzelmasse kommen kann (Hirano et al., 2009). In der Stadtbaumforschung wurde die Methode bislang nur selten angewandt (z.B. Čermák et al., 2000; Stokes et al., 2002) und das Testen der Nützlichkeit der Methode an sich stand klar im Fokus der Untersuchungen. Auch hier stellte sich heraus, dass noch weitere Entwicklungen, insbesondere auch für die nachgeschaltete Analyse der relativ einfach und schnell zu messenden Daten erforderlich sind (Stokes et al., 2002). Routinemäßig wird die Methode für Wurzeluntersuchungen bislang weder in den Forstwissenschaften noch in der Stadtbaumforschung angewandt.

Die seltene Möglichkeit der Rodung und anschließenden Wurzeluntersuchungen ergab sich nach dem Laubfall im zweiten Versuchsjahr, als die Bäume das Ende des vierten Standjahres erreicht hatten. Alle Versuchsbäume wurden mit Hilfe eines Ballenschneiders ausgehoben und in die drei Kompartimente Krone, Stamm und

Wurzelbereich zersägt. Aus logistischen Gründen standen für diese Prozedur nur die vier heimischen Baumarten und Sorten Verfügung.

Die oberhalb des Wurzelkragens gekappten Wurzelballen wurden vorsichtig ausgewaschen, um Steine und Bodenpartikel zu entfernen, und dann mit der weiteren Biomasse gelagert. Während der Wasch-Prozedur konnten Feinwurzeln (< 2 mm) nicht bewahrt werden. Bei der ballierten Amerikanischen Stadt-Linde und der Säulen-Hainbuche mussten außerdem die innerhalb der vier Standjahre nicht verrotteten Fragmente der Drahtkörbe entfernt werden. Beim Feld-Ahorn war die Ballierung hingegen bereits vollständig verrottet. Nach Taeger (2017) sind Gründe für eine geringere Zersetzung von Balliermaterialien ein tonlastiger Originalballen mit mangelnder Luftkapazität oder stark sandige Ballen mit schnellem Wasserabzug, beide in Verbindung mit geringer Bodenaktivität und Wurzelbildung.

Im Folgenden wurde die Biomasse im Ofen bei 65 °C 72 Stunden getrocknet und anschließend mit einer Präzisionswaage (Auflösung 0,1 mg) zur Bestimmung des Trockengewichtes gewogen. Aus dem Verhältnis zwischen dem Gewicht der unterirdischen Wurzelbiomasse und dem der oberirdischen Spross-Biomasse wurde das Wurzel-Spross-Verhältnis ( $\text{g g}^{-1}$ ) berechnet. Dabei waren Blatt- und Feinwurzelbiomasse nicht berücksichtigt, wodurch die Kohlenstoffinvestition in die ober- und unterirdischen Pflanzenorgane nicht gänzlich abgebildet werden konnte. Gemäß Mokany et al. (2006) führt eine Nichtberücksichtigung der Feinwurzelbiomasse zwangsläufig zu einer Unterschätzung der Wurzelbiomasse und zu unsoliden Wurzel-Spross-Verhältnissen. Außerdem empfehlen sie, die Biomassekompartimente basierend auf ihrer physiologischen Funktion zu untersuchen und ins Verhältnis zu setzen, wie beispielsweise bei einer Quotientenbildung aus Feinwurzel- und Blattbiomasse. Da Stamm- und Grobwurzeln gewichtsmäßig dominieren, kann das Wurzel-Spross-Verhältnis dennoch gut repräsentiert werden. Die ermittelten Werte für die drei Arten und Sorten aus dem frischen Waldhabitat lagen mit 0,26-0,49 fast identisch hoch wie bei Mokany et al., bei denen Laubwälder in der gemäßigten Zone Werte von 0,23-0,46 erreichten (beides Median-Werte). Durch Multiplikation dieser Werte mit der oberirdischen Biomasse kann die unterirdische Wurzelbiomasse beziehungsweise der

im Untergrund gespeicherte Kohlenstoff für einen Einzelbaum oder gar einen ganzen Bestand abgeschätzt werden. Außerdem konnten die Ergebnisse der LAI-Messungen (Kap. 3.8.1) und einer begleitenden Untersuchung zur Feinwurzelproduktion der beiden Linden-Sorten, welche im Jahr 2017 durch den Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München durchgeführt wurde (Stratópoulos et al., 2019b; Zhang et al., 2019; 2020), für die Ergebnisinterpretation genutzt werden.



Abbildung 11. Binärbilder der Wurzelbereiche von vier Arten und Sorten

In gleicher Weise wie bei der Vermessung der Baumkronen im Rahmen der LAI-Messungen (Kap. 3.8.1) wurden die Dimensionen der Wurzelballen mit ausreichenden x, z Paaren vermessen und ihr Volumen unter Verwendung der Software FV2200 berechnet. Für eine weiterführende digitale Analyse der Wurzelarchitektur, wurde nach dem Trocknen und Wiegen von jedem Wurzelballen ein Foto mit Draufsicht gemacht (Abb. 11). Der Bildhintergrund wurde weiss gehalten, da dies für die anschließende Analyse von Vorteil ist. Die Bilder wurden mit Hilfe des frei nutzbaren Bildverarbeitungsprogrammes Fiji ImageJ (Schindelin et al., 2012) und dem Plugin DiameterJ (Hotaling et al., 2015) analysiert, welches ursprünglich für die Charakterisierung von Nanofasern entwickelt wurde. Zunächst wurden die Bilder in Schwarzweiß-Bilder (Binärbilder) konvertiert, in denen die weißen Pixel idealerweise die Wurzeln im Bild repräsentierten, wohingegen die schwarzen Pixel den Hintergrund erfassen sollten. Um eine bestmögliche Segmentierung zu erreichen, wurden unterschiedliche softwareinterne automatisierte Algorithmen ausprobiert (*autothreshold*) und der Algorithmus mit dem besten Segmentierungsergebnis für jedes einzelne Bild gewählt. Danach wurden in den Binärbildern rechteckige Gebiete definiert, in denen die Segmentierung wiederum die besten Ergebnisse erzielte, während die Bereiche des

Bildes, in denen Wurzeln nur unscharf von dem Hintergrund getrennt werden konnten oder Fremdkörper sichtbar waren, für die weitere Analyse ausgeschlossen wurden. Anhand der verbleibenden Szenen wurde dann das Analysetool angewandt. Die Ausgabe enthielt zusammenfassende Statistiken wie den mittleren Wurzeldurchmesser oder die Porosität (%), worüber Aussagen über die Dichte der Wurzelsysteme getroffen werden konnten.

Zu bedenken ist, dass die Ergebnisse bezüglich der Wurzelarchitektur für die reale Situation in der Stadt nicht uneingeschränkt nutzbar sind. Wurzelsysteme bilden sich nämlich nicht nur aufgrund genetischer Veranlagung auf eine bestimmte Weise aus, sondern auch als Reaktion auf die standörtlichen Bedingungen (Čermák et al., 2000; Reichwein, 2002). Einteilungen von Bäumen in „Flach-“ und „Tiefwurzler“ verlieren in Folge der Anwesenheit nahegelegener Leitungs- und Fundamentgräben oder bei der Verwendung von Substraten ihre Bedeutung (Reichwein, 2002, S. 122). Hier sind entscheidender Daten, welche die Dichte der Wurzelsysteme, ihre absolute Masse und das Wurzel-Spross-Verhältnis betreffen. Die in dieser Dissertation gemessenen Daten zur Ausdehnung der Wurzelstöcke, welche sich unter nahezu uneingeschränktem Platzangebot entwickeln konnten, sind jedoch von hoher Relevanz für die Pflanzung von Bäumen in Parkanlagen und fehlender Substratverwendung.

Abbildung 12 zeigt noch einmal zusammenfassend die gemessenen Baum- und Umgebungsparameter, welche in den Kapiteln 3.6-3.8 beschrieben wurden.

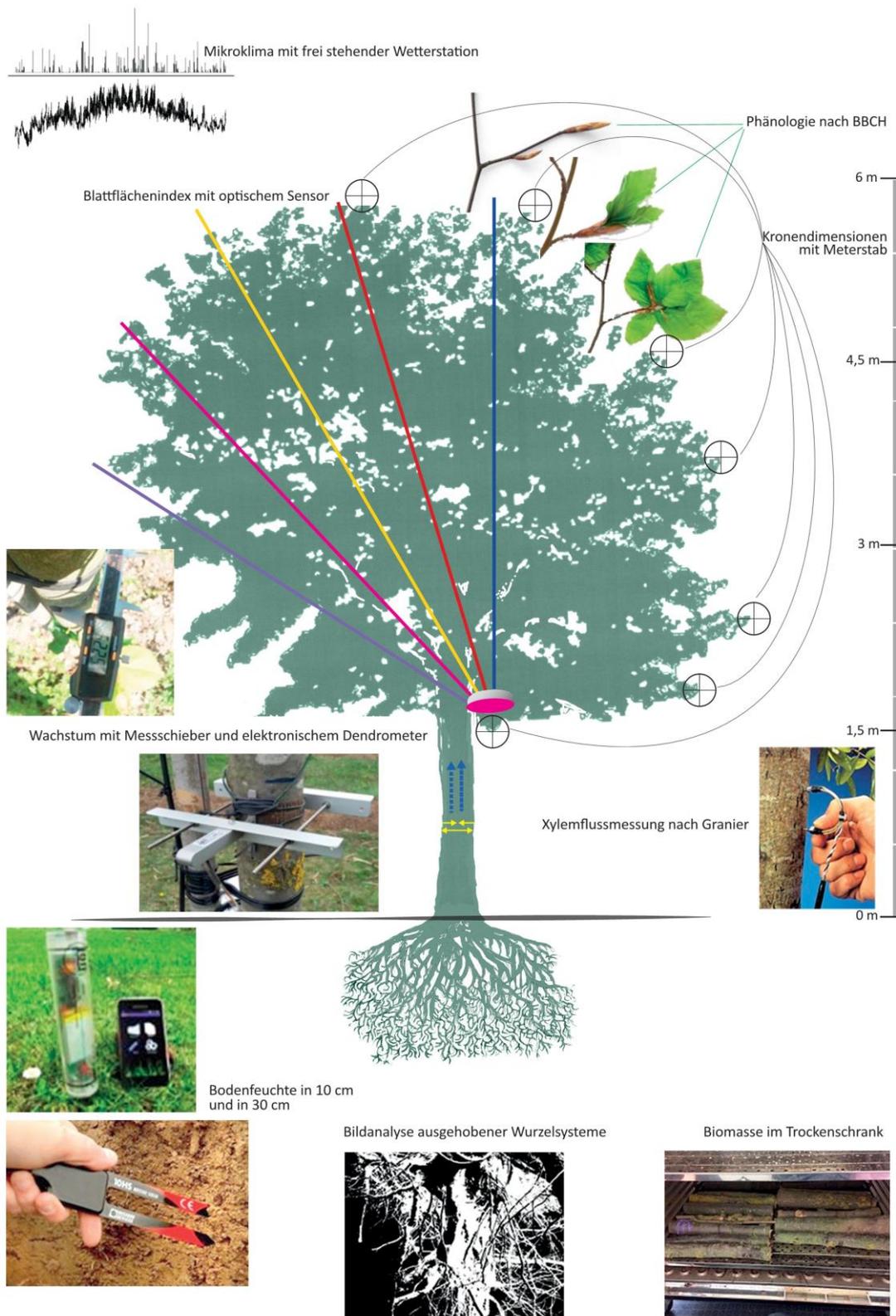


Abbildung 12. Übersicht der gemessenen Baum- und Umgebungsparameter. Bildquellen: Dendrometer: Rötzer, 2017; Trockenbiomasse: Zhang, 2018; Bodenfeuchte 10 cm: geneq.com, 2020; Bodenfeuchte 30 cm: onsetcomp.com, 2020.

### 3.9 Statistische und grafische Auswertung

Der überwiegende Teil der statistischen Auswertung und deren Visualisierung wurde mit dem Softwarepaket R, Versionen 3.2.1-3.5.3 (R Core Team, 2019) durchgeführt. Für einfaktorielle Mittelwertvergleiche erfolgten zunächst Tests auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test) und auf Gleichheit der Varianzen (Levene-Test). Im Falle normalverteilter Daten und Homoskedastizität wurden einfaktorielle Varianzanalysen (ANOVA) durchgeführt, im Falle nicht-parametrischer Daten beziehungsweise Varianzhomogenität der Kruskal-Wallis-H Test. Um herauszufinden, welche Mittelwerte sich signifikant unterscheiden, wurden anschließend Post-hoc-Tests berechnet (Tukey's Post-hoc-Test für parametrische und der Dunn-Bonferroni Test für nicht-parametrische Daten). Im Falle sehr unterschiedlicher Verteilungen oder einer zu geringen Stichprobenzahl wurde teilweise gänzlich auf Mittelwertvergleiche verzichtet oder ihre Ergebnisse nur begleitend zur beschreibenden Analyse der Medianwerte herangezogen, welche weniger empfindlich gegenüber Ausreißern sind.

Um für die Trockenbiomasse Austrocknungs- und Art- beziehungsweise Sorteneffekte zu evaluieren, wurde eine zweifaktorielle ANOVA für eine ungleiche Anzahl von Beobachtungen (*unbalanced design*) durchgeführt, wobei jeder Baum als unabhängige Wiederholung behandelt wurde. Die maximale Irrtumswahrscheinlichkeit für alle Tests lag bei  $\alpha = 0,05$  und p-Werte wurden als Ergebnisse ausgegeben. Je kleiner der p-Wert, desto mehr spricht das Ergebnis gegen die Nullhypothese und somit dagegen, dass es keine Unterschiede zwischen untersuchten Gruppen gab oder die Bodenaustrocknung keine Wirkung zeigte.

Zusätzlich wurden die Reaktionsmuster und -stärken des Wachstums und des Wasserverbrauchs im Hinblick auf die klimatischen und edaphischen Verhältnisse untersucht. Regressionsanalysen und Korrelationstests fanden hier Anwendung. Die Produktmomentkorrelation nach Pearson wurde für parametrische Daten angewendet, bei nicht-parametrischen Datensätzen Spearmans Rangfolgekorrelation. Insbesondere das Verhältnis zwischen der täglichen Xylemflussdichte ( $J_s$ ) und den atmosphärischen Treibern der Transpiration,  $D_z$  und PAR, wurde mit Hilfe von Kurvenanpassungen untersucht. Nach Peters et al. (2010) wurden die Reaktionsmuster der einzelnen Arten

und Sorten hinsichtlich ihres Verlaufes exponentiellen Sättigungsmodellen der Form  $y=a(1 - \exp(-bx))$  oder linearen Modellen zugeordnet. Aufgrund ihrer zumeist sehr guten Modellgüte, wurden die daraus resultierenden Funktionen zur Modellierung von fehlenden  $J_S$ -Werten verwendet, welche sich beispielsweise aufgrund von einer unterbrochenen Stromversorgung der Datenlogger ergaben.

Die Trockenheitsresistenz ( $R_{TK}$ ) wurde definiert als der Quotient zwischen den Werteaussprägungen eines Parameters in der Trockenvariante und in der Kontrolle (Kap. 2.5). Die Wassernutzungseffizienz ( $\text{cm}^2$  Zuwachs pro 100 l  $\text{H}_2\text{O}$ ; WUE) wurde definiert als das Verhältnis von auf Stammbasis fixiertem Kohlenstoff, repräsentiert durch die monatlichen Zuwächse, zu verbrauchtem Wasser.

In einem letzten Schritt wurde der Versuch einer Synthese der gewonnenen Daten unternommen. Eine Auswahl von Parametern wurde basierend auf ihrer Bedeutung jeweils für das Kühlpotenzial und die Trockenheitstoleranz vorgenommen (Kap. 5.3, Tabelle 11). Bei der Übersicht zur Trockenheitstoleranz wurden die Ergebnisse der Trockenbiomasse nicht integriert, da hier nur für vier Arten und Sorten Werte vorlagen, jedoch bei Bedarf begleitend genutzt. Bei der Wuchshöhe wurde anstelle eigener Daten auf die Erfahrungswerte des GALK Langzeitversuchs (Kap. 2.3.2) und den Angaben bei Roloff & Bärtels (2014) zurückgegriffen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Umweltbedingungen

#### 4.1.1 Klimatische Bedingungen

Das Jahr 2016 war mit 10,01 °C insgesamt wärmer als der langjährige Durchschnitt (1981-2010) von 9,7 °C (Tabelle 5), brachte aber keine neuen Temperaturrekorde wie die Vorjahre 2014 und 2015 oder auch die nachfolgenden Jahre. Die Niederschlagssummen im Januar und Februar waren überdurchschnittlich hoch (Abb. 13, Tabelle 5) und beendeten damit die große Trockenheit, welche 2015 im Süden Deutschlands geherrscht hatte. Zur Zeit des Blattaustriebes im letzten Drittel des Aprils kam es zu einem Kaltlufteinbruch (Abb. 13).

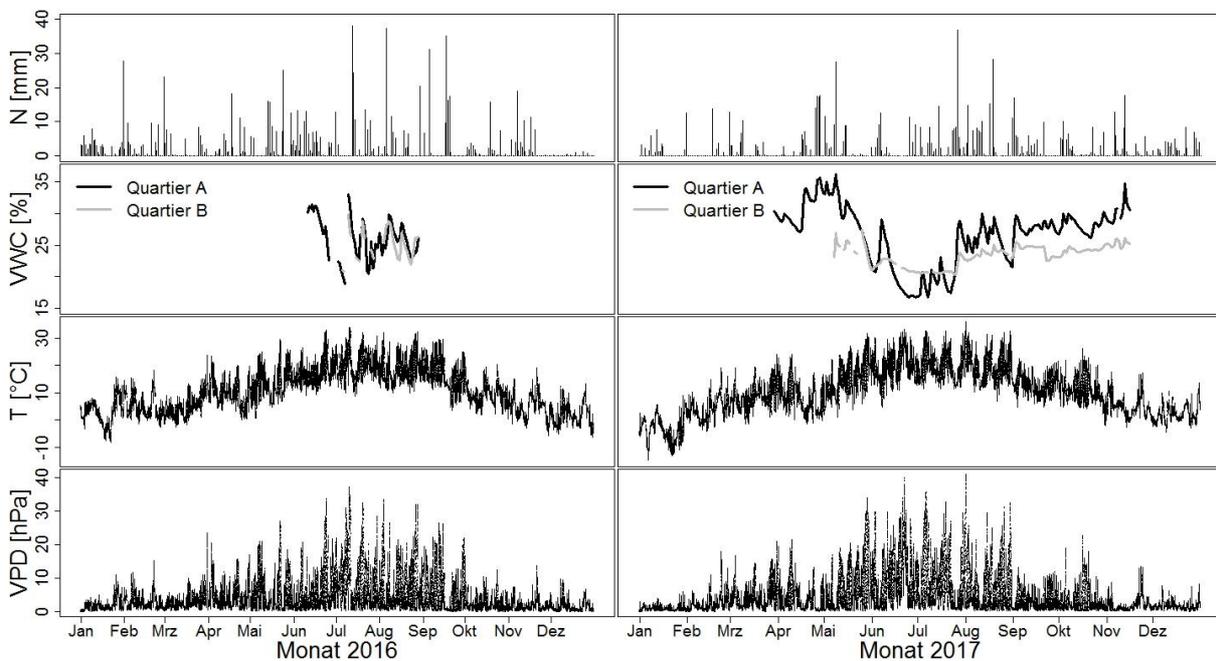


Abbildung 13. Klimavariablen und Bodenfeuchte für 2016 und 2017: Niederschlag (N; mm), Tagesmittelwerte des volumetrischen Bodenwassergehaltes (VWC) in 30 cm Bodentiefe in den zwei Versuchsquartieren und Zehn-Minuten-Werte der Temperatur (T) und des Sättigungsdefizites der Luft (VPD).

Auch Mai und Juni waren eher kühl und verregnet und es entluden sich zum Teil schwere Gewitter. Somit war die erste Jahreshälfte insgesamt sehr niederschlagsreich, bevor sich die Großwetterlage im Juli änderte (DWD, 2016). Der Juli war mit 19,71 °C und mit VPD-Werten über 30 hPa der wärmste Monat des Jahres. Am 11. Juli wurde auf

Quartier A mit 18,82 Vol.-% die niedrigste mittlere Bodenfeuchte ermittelt (Abb. 13). Trotz einiger Hitzewellen fielen jedoch auch im Sommer ausreichend Niederschläge, sodass es nicht zu längeren Trockenperioden kam. Der September gehörte dann zu den wärmsten Monaten seit Beginn der Aufzeichnungen mit 1,7 °C über dem langjährigen Mittel. Vor allem die erste Monatshälfte war außergewöhnlich warm und sonnig; hier kam es auch zu einer zehntägigen Trockenheitsphase mit VPD-Werten von teilweise noch über 20 hPa. Die restlichen Monate des Jahres waren dann zu kühl bis durchschnittlich warm.

Das warme jedoch auch verregnete Jahr 2016 bot keine idealen Bedingungen, um die Trockenheitstoleranz von Arten und Sorten zu testen. Dies wurde zum Anlass genommen, im darauffolgenden Versuchsjahr Messungen unter kontrollierten Versuchsbedingungen (Kap. 3.5) durchzuführen.

Tabelle 5. Klimawerte für die Versuchsjahre 2016 und 2017 und den Bezugszeitraum 1981-2010. Aufgetragen sind Monats- und Jahreswerte der Temperatur und des Niederschlages gemessen in der Baumschule München-Laim und das langjährige Mittel gemessen am Standort München-Stadt des Deutschen Wetterdienstes.

	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Σ/M
<b>Niederschlag [mm]</b>													
1981-2010	48	46	65	65	101	118	122	115	75	65	61	65	944
2016	93,4	76,4	44,3	62,2	115,6	109,2	116,3	104,1	118,3	45,0	69,2	4,7	954,9
2017	44,6	35,6	38,5	104,1	98,2	76,9	137,9	139,3	55,3	59,7	76,2	64,8	931,1
<b>Temperatur [°C]</b>													
1981-2010	0,3	1,4	5,3	9,4	14,3	17,2	19,4	18,9	14,6	10,1	4,4	1,3	9,7
2016	2,7	4,9	5,0	9,6	13,2	17,2	19,7	18,6	16,3	9,1	4,7	1,5	10,2
2017	-3,6	3,9	8,5	7,9	14,5	19,9	19,4	19,5	12,6	10,5	4,9	2,1	10,1

Deutschlandweit zählte das Jahr 2017 zu den acht wärmsten Jahren seit Beginn der Messungen 1881 mit einem leichten Überschuss an Niederschlägen und Sonnenschein (DWD, 2017). Das Jahr startete mit einem deutlich zu kalten Januar (-3,6 °C; Tabelle 5) mit zum Teil strengen Nachtfrösten. Darauf folgten ein milder Februar und ein deutlich zu warmer März (+3,15 °C im Vergleich zum Bezugszeitraum 1981-2010). Zu einem noch stärkeren Kälterückfall und Spätfrösten im Vergleich zum Vorjahr kam es im April 2017 (Abb. 13, Tabelle 5) mit zum Teil gravierenden Folgen für die schon sehr weit fortgeschrittene Vegetation (DWD, 2017). Daraufhin folgte ein sehr heißer, aber auch unbeständiger Sommer. Der Juni war der wärmste Monat mit 19,9 °C und mit 76,9 mm deutlich zu trocken. Am Ende dieses und zu Beginn des Folgemonats erreichte die Bodenfeuchte bei Quartier A ein Minimum von weniger als 17 Vol.-% in 30 cm Bodentiefe (Abb. 13). Im Juli und August fielen dann überdurchschnittlich hohe Niederschlagsmengen, wohingegen es im September erneut deutlich zu trocken (1981-2010: 75 mm; 2017: 55,3 mm) aber gleichzeitig auch unterdurchschnittlich kühl war. Insgesamt wurden im Sommer 2017 fast 40 l weniger Niederschlag erfasst als im Vorjahr 2016 (Tabelle 5). Im Oktober 2017 wurden Temperaturrekorde erreicht, weshalb er zu den wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen gehört (DWD, 2017). Das Jahr endete mit relativ hohen Niederschlägen.

#### 4.1.2 Bodenart und -austrocknung

Es wurden in den Versuchsflächen mäßig sandige Lehme (Amerikanische Stadt-Linde, Quartier A) bis stark lehmige Sande (Brabanter Silber-Linde, Quartier B) vorgefunden (Tabelle 3). Eine Interpretation der Retentionskurven in der Literatur ergab einen pF-Wert (dekadischer Logarithmus der Wasserspannung) von 1,8 (Feldkapazität) bei Bodenwassergehalten von 29 Vol.-% und 33 Vol.-% und einen pF-Wert von 4,2 (permanenter Welkepunkt; PWP) bei 12 Vol.-% und 16 Vol.-% für den stark lehmigen Sand beziehungsweise den mäßig sandigen Lehm (Sponagel, 2005, S. 350). Dieser PWP ist jedoch nicht als echter physiologischer Welkepunkt für die hier untersuchten Arten und Sorten zu verstehen, da er aus der Literatur entwendet wurde und nur für Ackerpflanzen gültig ist. Eigene Erhebungen für die einzelnen Arten und Sorten wurden nicht durchgeführt, dennoch kann der PWP als Indikator für Trockenstress genutzt werden (Kunz et al., 2016).

Die Analyse der Bodenfeuchtwerte zeigte eine hohe Korrelation ( $r_s = 0,65$ ) zwischen den Punktmessungen in 10 cm und den kontinuierlichen Messungen in 30 cm Bodentiefe. Der volumetrische Bodenwassergehalt (VWC) in 30 cm war mit durchschnittlich 24,44 Vol.-% um 6,32 Vol.-% höher als der nahe der Oberfläche (10 cm) mit durchschnittlich 18,11 Vol.-%.

Im Zeitraum vom 11. Mai 2017 (Start Installation der Regenausschluss-Konstruktionen) bis zum 16. November 2017, dem Tag, an dem die Xylemflussmessungen eingestellt wurden, wurden insgesamt 559,2 l Regenwasser pro  $m^2$  Bodenfläche abgehalten. Dies entspricht 60,1 % des Gesamtjahresniederschlages von 931,1 l  $m^{-2}$  (Tabelle 5). In 10 cm Bodentiefe hatten die ausgetrockneten Bodenareale signifikant ( $p < 0,001$ ) niedrigere VWC-Gehalte als die Kontrollflächen (Abb. 14). Der niedrigste punktuelle Wert (10,08 Vol.-%) wurde bei einer Amerikanischen Stadt-Linde (*Tc* 5) in der Trockenvariante Ende Juli gemessen und lag damit unterhalb des permanenten Welkepunktes. Der höchste Wert wurde mit 35,93 Vol.-% bei einem Spitz-Ahorn (*Ap* 3) in der Trockenvariante gemessen (Bodensättigung). Außerdem waren die VWC-Werte in 1 m Entfernung zu den Bäumen im Durchschnitt etwas höher (18,96 Vol.-%) als die in der Mitte der Überdachungen (17,04 Vol.-%).

In 30 cm Bodentiefe waren die Unterschiede zwischen den beiden Behandlungsvarianten nicht signifikant ( $p = 0,6306$ ), was an den unverhältnismäßig hohen VWC-Werten unter der Regenausschluss-Konstruktion des Spitz-Ahorns lag (Maximum: 41,2 Vol.-%), wo vermutlich Bodenverdichtung zu einem leichten Gefälle in der sonst sehr ebenen Baumschule geführt hatte. Am zentralsten in dieser Senke war der Einzelbaum *Ap* 3 platziert und erreichte somit auch die extremsten Werte. Ohne den Spitz-Ahorn waren die Unterschiede signifikant ( $p = 0,004$ ). Somit war die Bodenaustrocknung allgemein erfolgreich, auch wenn die Staunässe beim Spitz-Ahorn und die daraus resultierenden Konsequenzen bei der Datenanalyse berücksichtigt werden müssen.

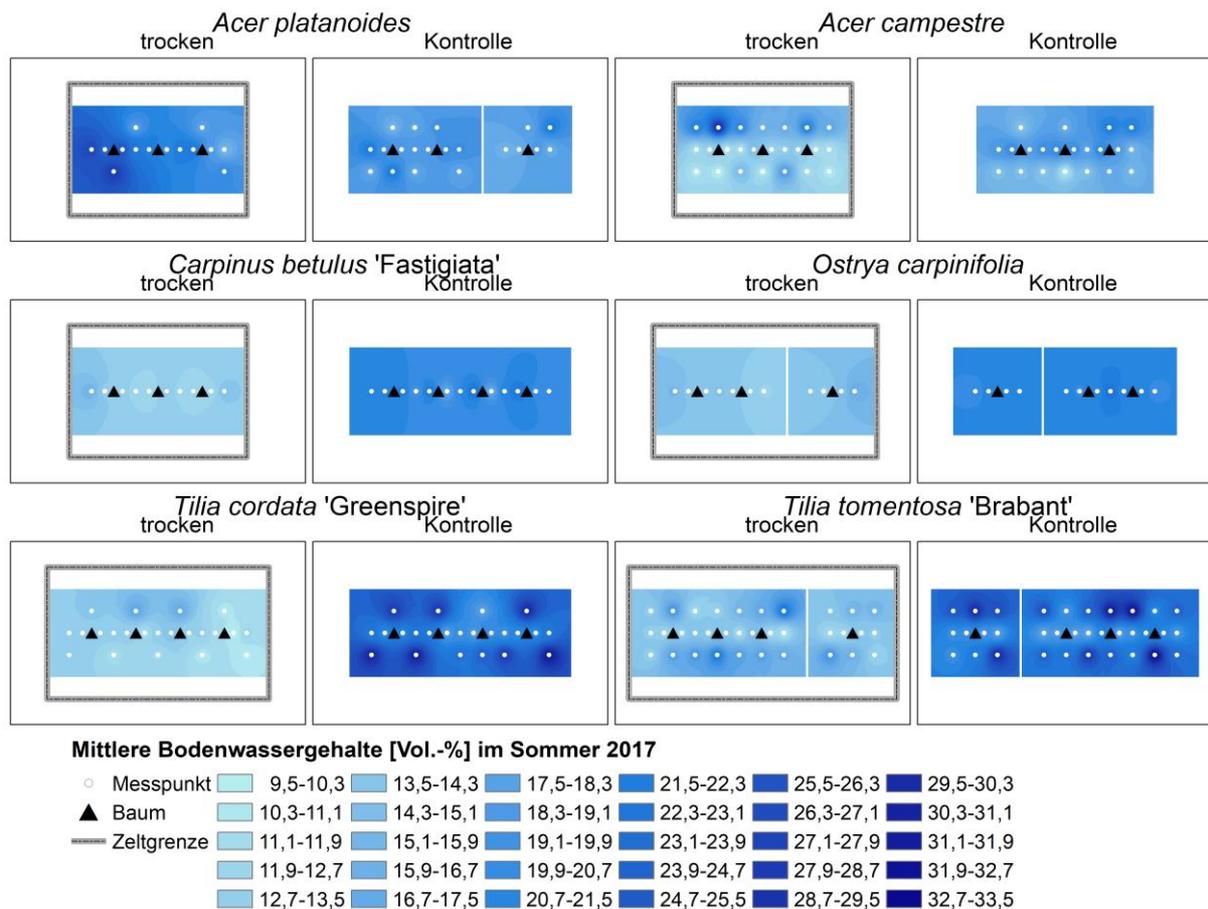


Abbildung 14. Volumetrische Bodenwassergehalte in 10 cm Bodentiefe gemessen in definierten Abständen von den Versuchsbäumen und gemittelt für vier Aufnahmetage des Sommers 2017. Die Wurzelbereiche der Bäume in den jeweils linken Einzelbildern wurden durch die Regenausschluss-Konstruktionen bedeckt (trocken), während die Bäume in den rechten Einzelbildern der Kontrolle angehörten. Verändert nach Stratópoulos et al., 2019b.

## 4.2 Belaubung und Kronenstruktur

### Kontrolle

Die Säulen-Hainbuche wies mit einem Blattflächenindex (LAI) von  $6,63 \pm 1,80 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  mit Abstand den höchsten Wert und gleichzeitig auch die höchste Wertestreuung aller Arten und Sorten auf (Tabelle 6). Bei dieser Sorte war es sehr schwierig, die sehr schmalen Baumkronen mit dem Sichtfeld des optischen Sensors einzufangen ohne gleichzeitig auch Bereiche des Himmels außerhalb der Baumkronen mit aufzunehmen (siehe auch Kap. 3.8.1). Insbesondere nach dem starken Rückschnitt Ende März 2017, welcher bei allen Arten und Sorten kleinere Kronenprojektionsflächen und -volumina im zweiten

Versuchsjahr zur Folge hatte, waren die Baumkronen zu klein, um sie mit dem optischen Verfahren messen zu können. Somit konnten keine Daten für das Jahr 2017 ermittelt werden. Ebenfalls dichte Kronen hatten der Spitz-Ahorn (2016:  $5,34 \pm 1,27 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , 2017:  $4,6 \pm 0,79 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ) und die Brabanter Silber-Linde (2016:  $5,87 \pm 1,57 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , 2017:  $4,95 \pm 1,62 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ). Die Hopfenbuche hatte im ersten Versuchsjahr den vierthöchsten LAI-Durchschnittswert mit  $5,27 \pm 1,05 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ , zeigte jedoch im zweiten Versuchsjahr einen sehr starken Abfall der LAI-Werte (2017:  $2,75 \pm 0,21 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ). Andersherum war es beim Feld-Ahorn: er hatte 2016 mit  $3,75 \pm 1,01 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  den niedrigsten LAI-Wert aller Arten und Sorten, im Jahr 2017 mit  $4,42 \pm 0,60 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  hingegen den dritthöchsten Wert (Säulen-Hainbuche nicht einbezogen). Die Amerikanische Stadt-Linde hatte beide Jahre niedrige LAI-Werte mit  $4,37 \pm 1,03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  und  $4,08 \pm 0,90 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ .

Tabelle 6. Kronendimensionen und Blattflächenindex der sechs Arten und Sorten (für 2017 aufgeteilt nach Behandlung (Kontrolle und trocken)). Die Dimensionen und der Blattflächenindex (LAI) wurden 2016 und 2017 jeweils Mitte August gemessen. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

Art/ Sorte	Kronenprojektionsfläche [ $\text{m}^2 \pm \text{SD}$ ]		Kronenvolumen [ $\text{m}^3 \pm \text{SD}$ ]		LAI [ $\text{m}^2 \text{ m}^{-2} \pm \text{SD}$ ]	
<b>2016</b>						
<i>Ap</i>	$2,78 \pm 1,84$		$4,85 \pm 0,76$		$5,34 \pm 1,27$	
<i>Ac</i>	$4,30 \pm 1,31$		$3,53 \pm 1,37$		$3,75 \pm 1,01$	
<i>Cb</i>	$0,89 \pm 0,13$		$1,47 \pm 0,27$		$6,63 \pm 1,80$	
<i>Oc</i>	$3,07 \pm 0,55$		$4,23 \pm 0,51$		$5,27 \pm 1,05$	
<i>Tc</i>	$1,20 \pm 0,37$		$1,27 \pm 0,27$		$4,37 \pm 1,03$	
<i>Tt</i>	$1,80 \pm 0,77$		$1,89 \pm 0,67$		$5,87 \pm 1,57$	
<b>2017</b>						
	Kontrolle	trocken	Kontrolle	trocken	Kontrolle	trocken
<i>Ap</i>	$0,83 \pm 0,51$	$1,15 \pm 0,38$	$1,01 \pm 0,50$	$1,14 \pm 0,32$	$4,60 \pm 0,79$	$3,90 \pm 0,92$
<i>Ac</i>	$0,75 \pm 0,28$	$0,81 \pm 0,39$	$0,64 \pm 0,25$	$0,67 \pm 0,23$	$4,42 \pm 0,60$	$5,37 \pm 1,31$
<i>Cb</i>	$0,25 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,09$	$0,11 \pm 0,55$	--	--
<i>Oc</i>	$0,72 \pm 0,23$	$0,52 \pm 0,39$	$0,51 \pm 0,15$	$0,40 \pm 0,33$	$2,75 \pm 0,21$	$2,67 \pm 0,67$
<i>Tc</i>	$0,68 \pm 0,55$	$0,91 \pm 0,47$	$0,65 \pm 0,20$	$0,68 \pm 0,22$	$4,08 \pm 0,90$	$2,73 \pm 0,55$
<i>Tt</i>	$1,34 \pm 0,43$	$1,19 \pm 0,79$	$1,15 \pm 0,42$	$0,92 \pm 0,34$	$4,95 \pm 1,62$	--

Die beiden besonders wuchsschwach gezüchteten Sorten Säulen-Hainbuche und Amerikanische Stadt-Linde wiesen in beiden Jahren die geringsten Kronenprojektionsflächen auf. Das Kronenvolumen war im Jahr 2016 ebenfalls am niedrigsten bei den beiden Sorten, im Jahr 2017 hatten Hopfenbuche und Säulen-Hainbuche die niedrigsten Werte.

#### *Trockenvariante*

Bei der Amerikanischen Stadt-Linde zeigte sich eine deutliche Abnahme des LAI durch die Bodenaustrocknung (Kontrolle:  $4,08 \pm 0,90 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ; trocken:  $2,73 \pm 0,55 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ ). Auch der heimische Spitz-Ahorn hatte in der Trockenvariante einen geringeren LAI, wohingegen bei Feld-Ahorn und Hopfenbuche aus dem trockeneren Lebensbereich die Bodenaustrocknung keinen niedrigeren LAI bis zum Aufnahmezeitpunkt im August bedingte. Die Messwerte zeigten beim Feld-Ahorn sogar einen entgegengesetzten Trend hin zu höheren LAI-Werten bei geringerer im Vergleich zu höherer Bodenfeuchte. Die pyramidenförmige, schmal wachsende Säulen-Hainbuche erreichte in beiden Behandlungsvarianten die niedrigste Kronenprojektionsfläche (Kontrolle:  $0,25 \pm 0,03 \text{ m}^2$ ; trocken:  $0,14 \pm 0,01 \text{ m}^2$ ) und -volumina (Kontrolle:  $0,36 \text{ m} \pm 0,09 \text{ m}^3$ ; trocken:  $0,11 \pm 0,55 \text{ m}^3$ ).

### **4.3 Frühjahrs- und Herbstphänologie**

#### *Kontrolle*

Bei der Mehrheit der Bäume begann das Knospenschwellen (BBCH 01) um den Monatswechsel zwischen März und April. Im ersten Versuchsjahr trat dieses phänologische Stadium jedoch fünf Tage später ein (04. April) als im zweiten Versuchsjahr (31. März) (Abb. 15), welches sich durch einen überdurchschnittlich warmen März auszeichnete (Kap. 4.1.1). Im Jahr 2016 zeigten Säulen-Hainbuche und Hopfenbuche das früheste Knospenschwellen am 30. März, wohingegen der Feld-Ahorn erst zum 08. April ein entsprechendes Stadium erreichte. Die Knospen der beiden Linden-Sorten begannen - wie auch bei den Birkengewächsen - zum gleichen Zeitpunkt zu schwellen (04. April). Im zweiten Versuchsjahr wurde für die Mehrheit aller Bäume das Knospenschwellen auf den 31. März datiert. Die Hopfenbuche zeigte den frühesten

mittleren Eintrittstermin (27. März), wohingegen die Knospen des Spitz-Ahorns erst eine Woche nach der Hopfenbuche zu schwellen begannen. Auch in diesem Jahr zeigten die Linden-Sorten identische Eintrittstermine. Vom 01. Januar bis zum Beginn des Blattaustriebes (BBCH 07) am 02. April im Jahr 2016 beziehungsweise am 31.03. im Jahr 2017 akkumulierte die Hopfenbuche mit 277,0 und 321,7 in beiden Versuchsjahren die geringsten Wärmesummen bis zum Blattaustrieb. Die Amerikanische Stadt-Linde benötigte im Jahr 2016 mit 504,4 Tagesgraden die höchsten Wärmesummen, im Jahr 2017 war es der Spitz-Ahorn mit 408 Gradtagen. Unterschiede waren auch bezüglich des Kältereizes sichtbar, den Bäume brauchen um ihre Dormanz nach dem Winter zu beenden. Vom Einsetzen der Vegetationsruhe (BBCH 97) im Jahr 2016 bis zum Blattaustrieb (BBCH 07) im Frühjahr 2017 benötigte die Amerikanische Stadt-Linde mit 94 Tagen unter 5 °C den höchsten, die beiden Ahorne mit 92 Tagen unter 5 °C einen mittleren und Säulen-Hainbuche, Hopfenbuche und Brabanter Silber-Linde mit jeweils 83 Tagen unter 5 °C den niedrigsten Kältereiz (*chill days*).

Fünf (2016) bis sechs Wochen (2017) nach Beginn des Knospenschwellens wurde die Vollendung der Blattentfaltung (BBCH 19) kodiert. Im Vergleich zum Knospenschwellen zeigten sich hier größere Unterschiede zwischen den Arten und Sorten beziehungsweise größere Streuungen innerhalb einer Art beziehungsweise Sorte. Auch gab es erhebliche Unterschiede bei den Eintrittszeitpunkten trotz verwandtschaftlicher Nähe, welche beim Knospenschwellen zunächst sehr ähnliche Reaktionsmuster verursacht hatte. Im Jahr 2016, in dem im Januar und Februar überdurchschnittlich hohe Temperaturen gemessen wurden (Kap. 4.1.1), hatte die Hopfenbuche zum 06. Mai am frühesten ihre Blätter entfaltet, wobei die Variabilität hier sehr hoch war. Im Gegensatz dazu hatte diese Art im Jahr 2017 gemeinsam mit der Brabanter Silber-Linde am spätesten die Blätter entfaltet, nämlich zum 19. Mai. In umgekehrter Weise war diese Inkonsistenz zwischen den Jahren auch bei der Amerikanischen Stadt-Linde feststellbar: sie zeigte 2016 die späteste Entwicklung gemeinsam mit der Brabanter Silber-Linde, 2017 hingegen den frühesten Blattaustrieb aller Arten und Sorten. Spitz-Ahorn und Säulen-Hainbuche lagen beide Jahre mit ihrem Blattaustrieb im allgemeinen Mittel (2016: 09. Mai, 2017: 11. Mai). Der Feld-Ahorn zeigte 2016 etwas frühere Eintrittstermine als 2017 und eine starke Streuung im zweiten Versuchsjahr.

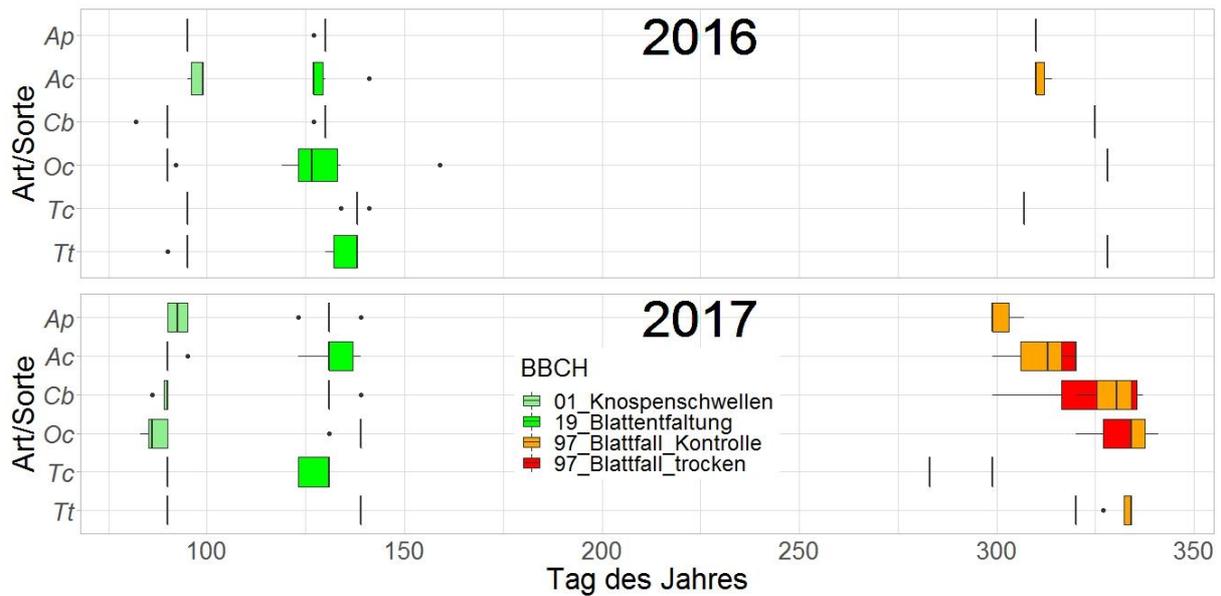


Abbildung 15. Eintrittszeitpunkte der phänologischen Stadien der Blattentwicklung für die sechs Arten und Sorten in den zwei Versuchsjahren und für die zwei Behandlungsvarianten (Kontrolle und trocken) im Trockenstressexperiment 2017. Die Kastengrafiken zeigen die Streuung und den Median für das Knospenschwellen (BBCH 01), die Vollendung der Blattentfaltung (BBCH 19) und das Ende des Blattfalles im Herbst (BBCH 97).

Im Schnitt waren die Blätter in beiden Versuchsjahren bei den meisten Bäumen Mitte November abgefallen (BBCH 97). Hier gab es nur zwischen den Ahornarten im Jahr 2016 eine synchrone Entwicklung; die Linden-Sorten hingegen zeigten sehr unterschiedliche Eintrittstermine. Die Amerikanische Stadt-Linde war bereits als erste Art/Sorte zum 02. November im Jahr 2016 kahl und am 26. Oktober im Jahr 2017, während die Brabanter Silber-Linde gemeinsam mit der Hopfenbuche ihre Blätter zuletzt verlor, nämlich drei bis vier Wochen später (2016: 23. November, 2017: 30. November). Spitz- und Feld-Ahorn waren 2016 am 05. November entlaubt, wohingegen 2017 der Spitz-Ahorn gemeinsam mit der Amerikanischen Stadt-Linde seine Blätter bereits im Oktober zwei Wochen vor dem Feld-Ahorn abgeworfen hatte. In beiden Versuchsjahren behielt die Säulen-Hainbuche ihre Blätter am drittlängsten. Die Hopfenbuche zeigte in beiden Jahren die längste Vegetationsperiode, da ihre Knospen am frühesten zu schwellen begannen und sie ihre Blätter bis spät in den November (2016) und in Einzelfällen sogar bis Anfang Dezember (2017) trug. Besonders war bei dieser Art auch, dass die Blätter vor dem Abwurf keine ausgeprägte Herbstfärbung aufwiesen.



Abbildung 16. Vorzeitiger Blattfall bei der Amerikanischen Stadt-Linde im Spätsommer

### *Trockenvariante*

Bäume im Regenausschlussexperiment waren im Schnitt drei Tage früher (16. November 2017) ohne Blätter als die Kontrolle (19. November 2017). Die Amerikanische Stadt-Linde war zum 10. Oktober mehr als fünf Wochen früher als der Durchschnitt aller Bäume und gute zwei Wochen früher als die Kontrolle (26. Oktober) entlaubt. Erste Blätter verfärbten sich bereits im Juli und im September waren die Kronen sehr licht infolge des vorzeitigen Blattfalls (Abb. 16). Nach der Amerikanischen Stadt-Linde folgte der Spitz-Ahorn am 26. Oktober, bei dem es zwischen Trockenvariante und Kontrolle aufgrund der gescheiterten Bodenaustrocknung (Kap. 4.1.2) keinen Unterschied gab. Feld-Ahorn und Brabanter Silber-Linde verloren ihre Blätter zum 16. November und die Hopfenbuche konnte, gemeinsam mit der heimischen Säulen-Hainbuche, ihre Blätter am längsten an den Trieben halten – sie waren mehrheitlich kahl zum 30. November. Bei Betrachtung der Median-Werte gab es bei der Hopfenbuche keinen Austrocknungseffekt und die Säulen-Hainbuche behielt in der Trockenvariante ihre Blätter sogar durchschnittlich drei Tage länger an den Trieben als in der Kontrolle.

Allerdings waren bei Feld-Ahorn und Säulen-Hainbuche auch die höchsten Standardabweichungen zu finden. Eine Säulen-Hainbuche war bereits am 26. Oktober kahl und somit zumindest ein starker Einzeleffekt messbar. Beim Feld-Ahorn waren es fast zwei Wochen, die die Bäume in der Trockenvariante ihre Blätter länger behielten als in der Kontrolle. Allerdings gab es auch hier eine starke Standardabweichung.

---

### *Zwischenfazit:*

Die Kronendimensionen und die Dichte des Bewuchses sind wichtige Einflussfaktoren für die Kühlleistung. Während die Kronendimensionen durch Pflegemaßnahmen stark beeinflusst werden können, ist der Blattflächenindex eine bedeutende **art-beziehungsweise sortenspezifische** Größe.

- Bäume aus dem Lebensbereich (LB) 6 wiesen **weniger dicht belaubte Kronen** auf als Bäume aus LB 3. Bei der Brabanter Silber-Linde, welche auf der Wurzelunterlage der heimischen Sommer-Linde veredelt wurde, war diese Beobachtung jedoch nicht gültig.
  - Bei intensiver Trockenheit zeigte die Amerikanische Stadt-Linde **deutlich verfrühte Blattverfärbung und Blattfall**, was ihr Kühlpotenzial stark reduzierte.
- 

## **4.4 Wasserverbrauch**

### 4.4.1 Xylemflussdichte und Saftfluss im Jahresverlauf

#### *Kontrolle*

Der Xylemfluss im Jahresverlauf wird für das zweite Versuchsjahr beschrieben, welches insbesondere in der ersten Jahreshälfte im Vergleich zum Vorjahr deutlich trockener war (Tabelle 5). Zwischen Anfang Juni und Ende September, dem Zeitraum, für den kontinuierliche Xylemflussdaten vorlagen und Beeinträchtigungen durch die Frühjahrs- und Herbstphänologie ausgeschlossen werden konnten, erreichte die Brabanter Silber-Linde mit durchschnittlich  $125,45 \text{ g H}_2\text{O cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  die höchste Xylemflussdichte ( $J_S$ ), gefolgt vom Spitz-Ahorn mit  $118,18 \text{ g H}_2\text{O cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  (Abb. 17). Mittlere  $J_S$ -Werte wiesen Feld-Ahorn und Säulen-Hainbuche mit  $107,1 \text{ g H}_2\text{O cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  beziehungsweise  $100,31 \text{ g H}_2\text{O cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  auf. Die niedrigsten  $J_S$ -Werte wurden bei der Hopfenbuche mit

78,23 g H<sub>2</sub>O cm<sup>-2</sup> Tag<sup>-1</sup> und der Amerikanischen Stadt-Linde mit 73,17 g H<sub>2</sub>O cm<sup>-2</sup> Tag<sup>-1</sup> gemessen. Die Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern hatten somit 1,1-fach höhere J<sub>s</sub>-Werte als die Arten und Sorten aus dem frischeren Lebensbereich.

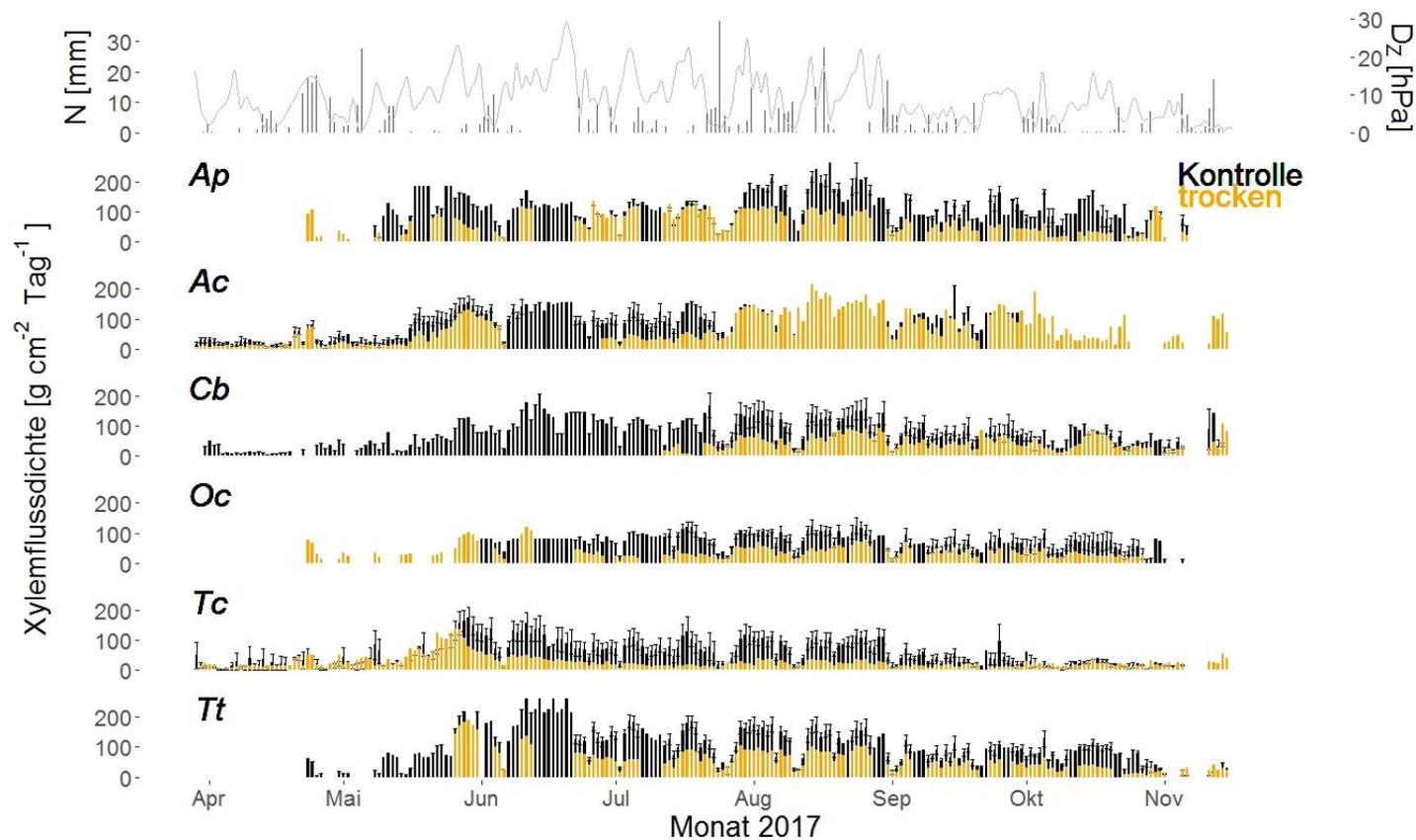


Abbildung 17. Jahresgang der Xylemflussdichte und ausgewählter Klimadaten 2017. Die Grafik zeigt die Niederschlagssummen (N), die auf die Tageslänge normalisierte Werte des Sättigungsdefizites der Luft ( $D_z$ ), sowie die Tagessummen der Xylemflussdichte für die sechs Arten und Sorten in der Kontrolle (schwarz) und der Trockenvariante (orange). Jeder Balken entspricht dem Mittelwert aller gemessenen Bäume pro Art beziehungsweise Sorte. Fehlende meteorologische Daten, entstanden durch Geräteausfälle, wurden durch Daten des Deutschen Wetterdienstes ersetzt, gemessen in der nahe gelegenen Messstation München-Stadt (online verfügbar); Datenlücken bei den Kontrollpflanzen wurden für Mitte Mai bis Ende Oktober mit Hilfe der Werte von  $D_z$  modelliert (Kap. 3.10). Fehlerbalken repräsentieren die Variabilität der Kontrollgruppen als Standardabweichung. Um die Standardabweichung und modellierte Werte der Kontrollen erweitert nach Stratópoulos et al., 2019b.

Mit ihrem starken Wachstum (siehe folgendes Kapitel) und den zu Beginn der Messkampagne bereits sehr großen Stammdurchmessern (Tabelle 2), hatte die Brabanter Silber-Linde auf den gesamten Stammquerschnitt gerechnet einen noch umso höheren Gesamtwasserverbrauch mit durchschnittlich  $4 \text{ l Tag}^{-1}$  (Abb. 18). Spitz- und Feld-Ahorn verbrauchten durchschnittlich  $2,8$  beziehungsweise  $2,4 \text{ l Tag}^{-1}$ , bei der Säulen-Hainbuche waren es  $2,3 \text{ l Tag}^{-1}$ . Anders als bei der Xylemflussdichte hatte die Amerikanische Stadt-Linde aufgrund ihrer größeren Stammdimensionen mit  $1,8 \text{ l Tag}^{-1}$  einen geringfügig höheren Wasserverbrauch als die Hopfenbuche mit  $1,7 \text{ l Tag}^{-1}$ .

Unterschiede ergaben sich auch in der Dynamik des Wasserverbrauches im Jahresverlauf 2017 zwischen den Arten und Sorten (Abb. 17, 18). Bei der Amerikanischen Stadt-Linde wurde der maximale Wasserverbrauch von  $3,9 \text{ l Tag}^{-1}$  bereits Ende Mai kurz nach der Blattentfaltung und zur Zeit der ersten Hitzewelle (Kap. 4.1.1) erreicht mit einer Tendenz zu absinkenden Werten in den darauffolgenden Sommer- und Herbstmonaten. Dies führte auch zu einem hohen Wasserverbrauch relativ früh im Jahr. Die Brabanter Silber-Linde verbrauchte ebenfalls am meisten Wasser früh im Jahr und zeigte denselben Abfall in der Folgezeit. Wie bei der im Vergleich zur Amerikanischen Stadt-Linde um eine Woche verzögerten Blattentfaltung (Kap. 4.3), ergab sich das Maximum des Wasserverbrauches mit  $8,4 \text{ l Tag}^{-1}$  auch erst etwas später im Juni. Weniger starke Änderungen im Jahresverlauf wurden beim Feld-Ahorn, der Säulen-Hainbuche und – am wenigsten – bei der Hopfenbuche registriert. Im Vergleich zu allen anderen Arten und Sorten führten beim Feld-Ahorn auch die unterdurchschnittlich kühlen Witterungsbedingungen im September (Kap. 4.1.1) nicht zu einem nennenswerten Abfall des Saftflusses. Der Spitz-Ahorn hatte wiederum ein ausgeprägtes Maximum im August. Im Mittel verbrauchte er in diesem Monat bis zu  $6,3 \text{ l Tag}^{-1}$ .

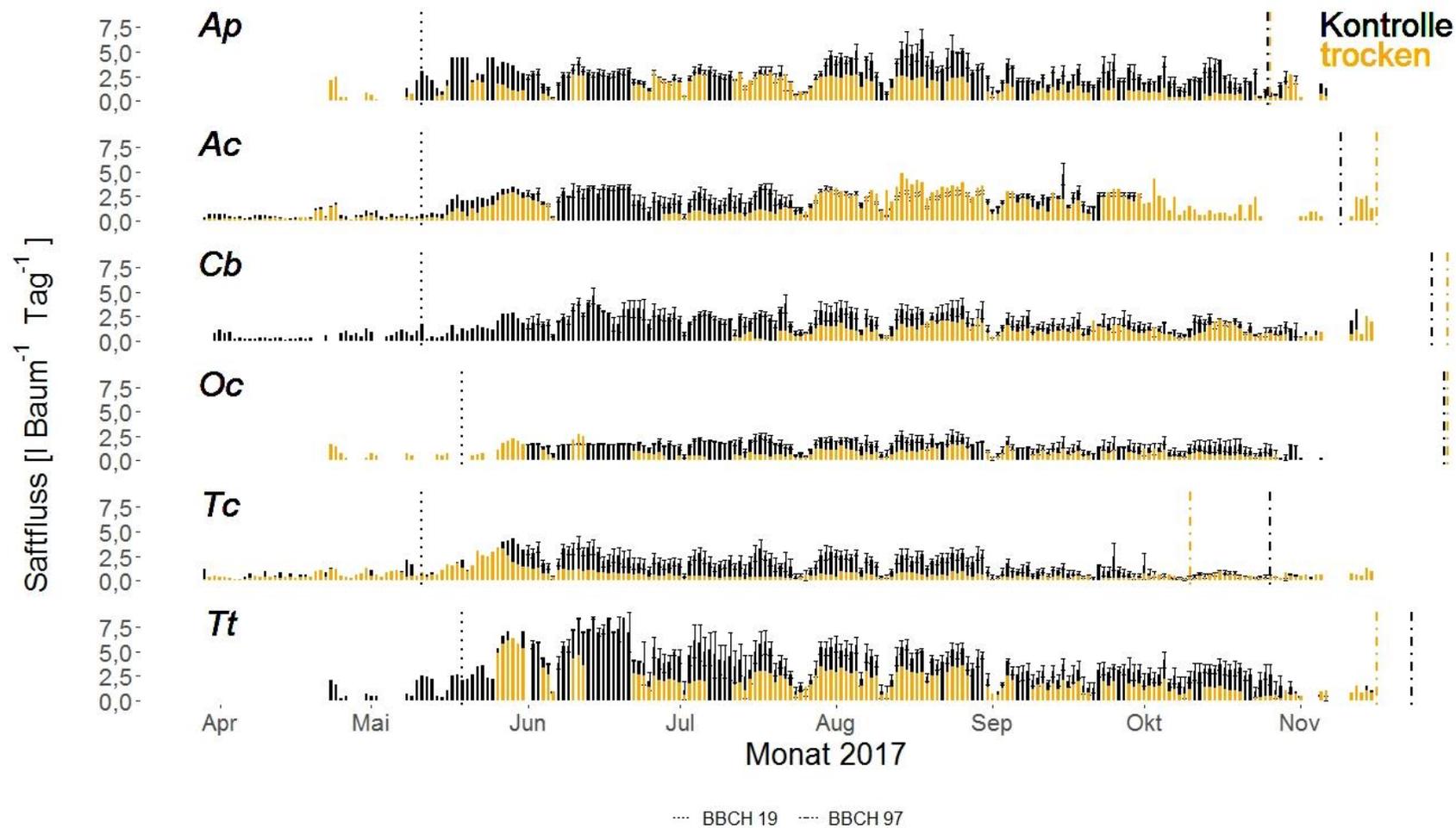


Abbildung 18. Jahrgang des Saftflusses und phänologische Eintrittstermine 2017. Jeder Balken entspricht der mittleren Tagessumme des Saftflusses aller gemessenen Bäume pro Art beziehungsweise Sorte in der Vegetationsperiode 2017 in der Kontrolle (schwarz) und in der Trockenvariante (orange). Fehlerbalken repräsentieren die Variabilität der Kontrollgruppen als Standardabweichung. Die senkrechten Linien markieren die mittleren Eintrittstermine (Mediane) für den Abschluss der Blattentfaltung (BBCH 19) und das Ende des Blattfalles (BBCH 97).

### *Unter Trockenheit*

Die starken Unterschiede im Zeitpunkt des Blattfalles, welche bei den zwei Behandlungen der Amerikanischen Stadt-Linde beobachtet werden konnten (Kap. 4.3), schlugen sich auch bei der Xylemflussdichte ( $J_s$ ) und dem Saftfluss nieder. In der Trockenvariante konnte die Amerikanische Stadt-Linde im Zeitraum Juni bis September durchschnittlich nur 31 % der täglichen  $J_s$ -Werte der Kontrolle erreichen (Abb. 17). Minderungen von  $J_s$  begannen bereits während der ersten Hitzewelle Ende Mai, kurz nach Blattentfaltung, und erreichten ihr stärkstes Ausmaß im Juli mit nur noch 13 %, als auch erste Blätter sich verfärbten und abfielen. Diese sehr geringe Resistenz führte – trotz relativ hoher Stammumfänge – auch zu dem niedrigsten Saftfluss aller Arten und Sorten mit durchschnittlich  $0,55 \text{ l Tag}^{-1}$  (Abb. 18). Die nahverwandte Brabanter Silber-Linde konnte unter Austrocknung mit 56 % der Kontrolle ihre Xylemflussdichte deutlich höher halten. Wie auch in der Kontrolle hatte sie in der Trockenvariante mit durchschnittlich  $2,13 \text{ l Tag}^{-1}$  den höchsten Gesamtwasserverbrauch beziehungsweise Saftfluss. Ähnlich hoch war der Austrocknungseffekt bei Säulen-Hainbuche und Hopfenbuche (jeweils 50 %  $J_s$  der Kontrolle). Sie verbrauchten in der Trockenvariante durchschnittlich  $1,12 \text{ l Tag}^{-1}$  beziehungsweise  $0,87 \text{ l Tag}^{-1}$ . Bei Spitz- und Feld-Ahorn, deren Herbstphänologie und Wachstum (siehe folgendes Kapitel) nicht beziehungsweise nur geringfügig negativ von dem Austrocknungsexperiment beeinflusst waren, war auch  $J_s$  weniger gemindert. Der Feld-Ahorn zeigte mit  $0,87$  die höchste Resistenz; besonders im Spätsommer wies er in der Trockenvariante der Kontrolle vergleichbar hohe  $J_s$ -Werte auf. Aufgrund dessen erreichten Feld- und Spitz-Ahorn in der Trockenvariante auch den zweit- beziehungsweise dritthöchsten durchschnittlichen Saftfluss mit  $2 \text{ l Tag}^{-1}$  und  $1,80 \text{ l Tag}^{-1}$ . Erstaunlich ist der hohe Wasserverbrauch des Feld-Ahorns trotz seiner relativ kleinen Durchmesser, welche signifikant kleiner waren als die der beiden Linden-Sorten (Tabelle 2).

#### 4.4.2 Wasserverbrauch in Abhängigkeit von Umweltvariablen

Die Dynamiken des Xylemflusses waren stark an die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen geknüpft. In der Tendenz stellte sich ein relativ hoher Xylemfluss ( $J_s$ ) an Tagen mit hohen Sättigungsdefiziten der Luft ( $D_z$ ; Abb. 19), hoher photosynthetisch

aktiver Strahlung (PAR; Abb. 20) und wenig bis keinem Niederschlag ein ( $r_s Ap = -0,26$ ,  $r_s Ac = -0,37$ ,  $r_s Cb = -0,32$ ,  $r_s Oc = -0,4$ ,  $r_s Tc = -0,33$ ,  $r_s Tt = -0,45$ , alle Korrelationen höchst signifikant mit  $p < 0,001$ ), wohingegen ein niedriger Wasserverbrauch an regnerischen Tagen mit geringen PAR- und  $D_z$ -Werten verzeichnet wurde. Die Analysen zeigten aber auch, dass der Wasserverbrauch bei sehr hohen  $D_z$ -Werten in den meisten Monaten und bei den meisten Arten und Sorten zum Stagnieren kam und somit eine Sättigung aufwies beziehungsweise zum Teil sogar einen Abfall im Vergleich zu dem Wasserverbrauch bei mäßig hohen  $D_z$ -Werten zeigte. Die Korrelation des Wasserverbrauches mit  $D_z$ -Werten konnte daher durchgehend am besten mit Hilfe exponentieller Sättigungsmodelle beschrieben werden (Abb. 19, Tabelle 7). Bei dem verwendeten Modell steht der Parameter a für das asymptotische Maximum der Funktion und Parameter b gibt Aufschluss darüber, wie schnell dieses Maximum erreicht ist. Hohe b-Werte bedeuten, dass das asymptotische Maximum bei relativ niedrigen  $D_z$ -Werten erreicht wird und folglich keine weitere Steigerung der Transpiration bei höheren  $D_z$ -Werten mehr auftritt (Sättigung), niedrige b-Werte weisen hingegen auf einen längeren Anstieg der Kurve bis zum Erreichen des Maximums hin. Ein Abflachen der Kurven wird mit einer starken stomatären Regulation der Transpiration assoziiert, was unmittelbar eine geringe Kühlleistung durch Transpiration bedingt (Kap. 2.3.3)

Die Modellgüte schwankte zwischen  $R^2 = 0,1$  (Spitz-Ahorn im August mit sehr hoher Wertespanne) und  $R^2 = 0,81$  (Amerikanische Stadt-Linde im September). Allgemein konnte der Xylemfluss der beiden Linden am besten mit Hilfe der gewählten Funktion beschrieben werden, was unter anderem der unproblematischen Durchführbarkeit der Xylemflussmessungen bei den Linden geschuldet sein dürfte (siehe Kap. 3.8.3).

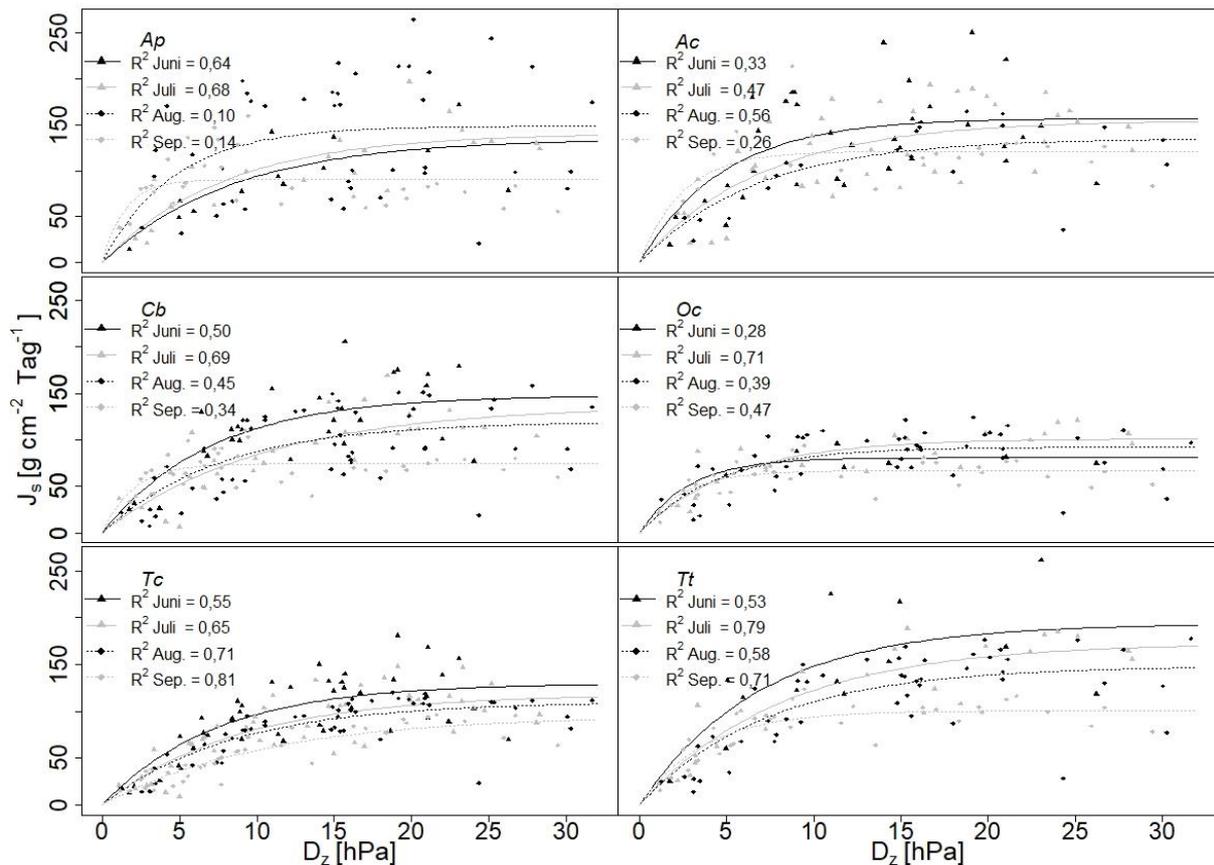


Abbildung 19. Tagessummen der Xylemflussdichte in Abhängigkeit vom Sättigungsdefizit der Luft für zusammengefasste Daten der Sommer 2016 und 2017. Die Xylemflussdichte ( $J_s$ ) ist aufgetragen gegen die auf die Tageslänge normalisierten Werte des Sättigungsdefizites der Luft ( $D_z$ ) und wird beschrieben durch das exponentielle Sättigungsmodell  $J_s = a (1 - \exp(-b D_z))$ . Jeder Datenpunkt im Diagramm ist der Mittelwert der für Einzelbäume ermittelten  $J_s$ -Werte pro Art beziehungsweise Sorte. Die Anpassungsgüte der Regressionen wird durch das Quadrat der Korrelationskoeffizienten ( $R^2$ ) abgebildet. Für Abkürzungen von Arten und Sorten siehe Tabelle 1. Erweitert um den Datensatz aus 2017 nach Stratopoulos et al., 2018.

Amerikanische Stadt-Linde und Brabanter Silber-Linde, Säulen-Hainbuche und Feld-Ahorn erreichten den höchsten Wasserverbrauch im Juni und zeigten in den darauffolgenden Monaten eine kontinuierliche Abnahme, wie aus den Parametern  $a$  der Sättigungsmodelle (asymptotische Maxima) hervorgeht (Tabelle 7). Anders verhielt es sich bei der Hopfenbuche und dem Spitz-Ahorn: bei ersterer wurde der höchste Wert im Juli, bei letzterem erst im August erreicht.

Tabelle 7. Modellparameter für die Korrelationen der täglichen Xylemflusswerte mit atmosphärischen Triebkräften. Gezeigt wird der Zusammenhang zwischen den auf die Tageslänge normalisierten Werte des Sättigungsdefizites der Luft ( $D_z$ ) beziehungsweise den Tagessummen der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und den Tagessummen der Xylemflussdichte ( $J_s$ ) beschrieben durch das exponentielle Sättigungsmodell  $J_s = a (1 - \exp(-b D_z))$  oder ein lineares Modell (fett). Die Parameter wurden für die Monate Juni bis September berechnet unter Verwendung der vorhandenen  $J_s$ -Werten der Jahre 2016 und 2017 als Mittel der jeweiligen Art beziehungsweise Sorte. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

	Juni			Juli			August			September		
<b><math>D_z</math> (hPa)</b>												
	A	B	$R^2$	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
<i>Ap</i>	135,20	0,12	0,64	140,82	0,13	0,68	148,43	0,22	0,10	90,39	0,69	0,14
<i>Ac</i>	156,95	0,21	0,33	154,89	0,14	0,47	135,17	0,15	0,56	121,05	0,41	0,26
<i>Cb</i>	148,21	0,14	0,50	137,19	0,10	0,69	119,84	0,13	0,45	74,60	0,51	0,34
<i>Oc</i>	80,94	0,36	0,28	101,26	0,19	0,71	92,30	0,22	0,39	67,08	0,42	0,47
<i>Tc</i>	130,21	0,14	0,55	118,37	0,12	0,65	110,42	0,12	0,71	95,74	0,10	0,81
<i>Tt</i>	193,76	0,14	0,53	173,02	0,12	0,79	148,52	0,14	0,58	100,71	0,27	0,71
<b>PAR (<math>\text{mol m}^{-2} \text{Tag}^{-1}</math>)</b>												
	A	B	$R^2$	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$	a	b	$R^2$
<i>Ap</i>	273,26	0,02	0,60	196,21	0,04	0,62	<b>43,36</b>	<b>4,23</b>	<b>0,28</b>	101,03	0,25	0,12
<i>Ac</i>	198,28	0,03	0,70	166,45	0,05	0,64	<b>20,97</b>	<b>4,55</b>	<b>0,93</b>	137,04	0,13	0,34
<i>Cb</i>	424,50	0,13	0,60	171,42	0,05	0,60	252,54	0,02	0,64	79,53	0,18	0,39
<i>Oc</i>	83,70	0,14	0,35	127,41	0,05	0,68	113,36	0,07	0,69	74,63	0,15	0,46
<i>Tc</i>	<b>12,90</b>	<b>3,11</b>	<b>0,57</b>	163,21	0,03	0,69	227,70	0,02	0,90	<b>-1,84</b>	<b>3,90</b>	<b>0,70</b>
<i>Tt</i>	279,28	0,03	0,48	308,45	0,02	0,78	310,12	0,02	0,84	121,78	0,10	0,71

Die Korrelation des Wasserverbrauches mit PAR konnte ebenfalls am besten mit Hilfe exponentieller Sättigungsmodelle beschrieben werden (Abb. 20, Tabelle 7), in einigen Fällen ergab sich jedoch eine bessere Passung mit einem linearen Modell, was bedeutet, dass es infolge geringer stomatärer Regulation zu keinem Abflachen der Kurven bei hoher Strahlung kam. Im konkreten betraf dies die Reaktionsmuster der beiden Ahorne im August, sowie die Amerikanische Stadt-Linde im Juni und September. In den Monaten Juli und August wies diese bei den Exponentialmodellen sehr niedrige b-Werte auf, was bedeutet, dass auch hier ein sehr progressiver, wenn auch etwas eingeschränkter Wasserverbrauch bei hoher Strahlung stattgefunden hat. Die Hopfenbuche zeigte auch bei dieser Analyse ein stark gegensätzliches Verhalten: ihre b-Werte waren stets hoch und die Kurven dementsprechend abgeflacht in Richtung

hoher Strahlungswerte. Die Säulen-Hainbuche zeigte ein weniger stetiges Verhalten: in den Monaten Juni, Juli und September wies sie ebenfalls hohe Steigungsraten von  $J_s$  bei niedrigen Strahlungswerten auf, wohingegen sie im August ein ähnliches Verhalten wie die Amerikanische Stadt-Linde zeigte. Der Wasserverbrauch der Brabanter Silber-Linde folgte in allen Monaten dem typischen Verlauf eines exponentiellen Sättigungsmodells, allerdings waren die b-Werte deutlich niedriger als bei der Hopfenbuche. Zwischen den beiden Ahornen waren die Unterschiede sehr gering außer im September, als der Spitz-Ahorn die schlechteste Modellgüte erreichte mit  $R^2 = 0,12$ . In diesem Monat zeigte sein Wasserverbrauch die stärkste stomatäre Regulation.

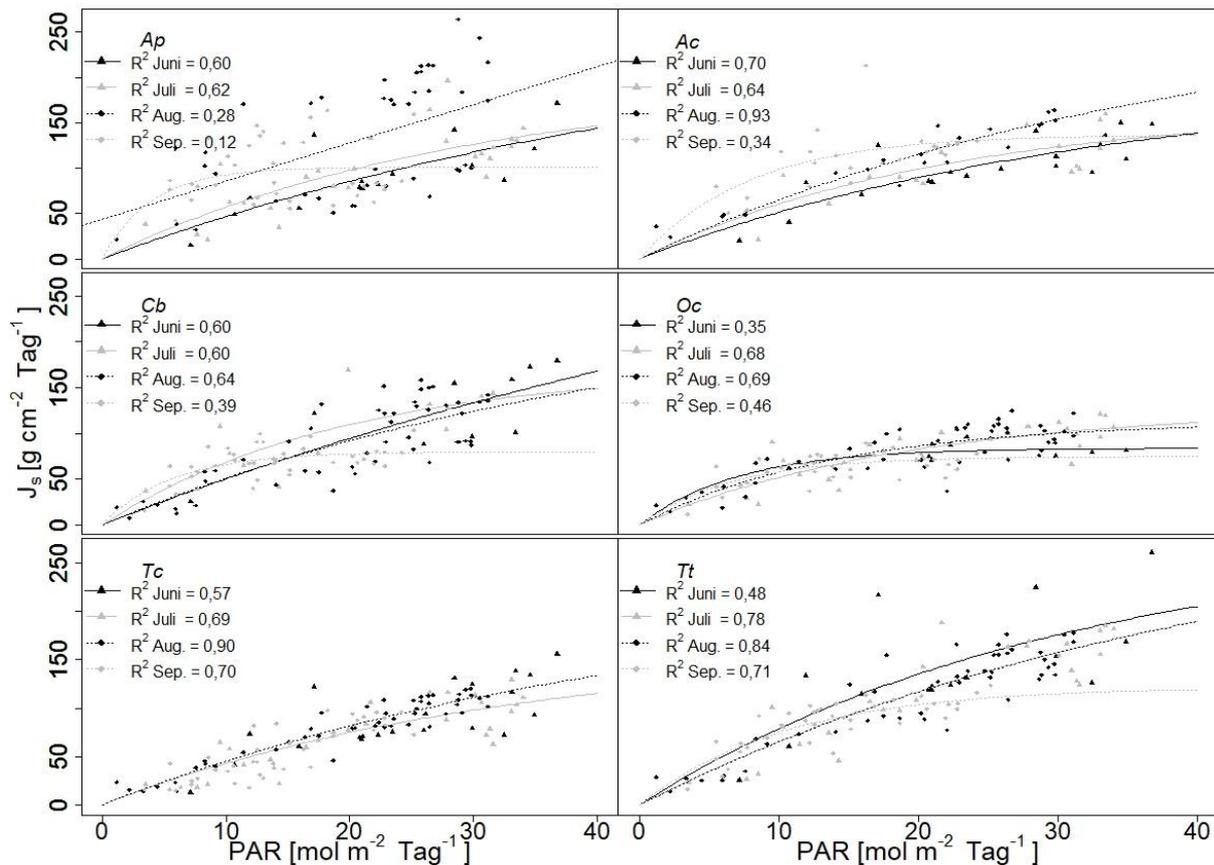


Abbildung 20. Tagessummen der Xylemflussdichte in Abhängigkeit von der photosynthetisch aktiven Strahlung im Sommer 2016 und 2017. Die Xylemflussdichte ( $J_s$ ) ist aufgetragen gegen die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) und wird beschrieben durch das exponentielle Sättigungsmodell  $J_s = a (1 - \exp(-b D_z))$  oder ein lineares Modell. Jeder Datenpunkt im Diagramm ist der Mittelwert der für Einzelbäume ermittelten  $J_s$ -Werte pro Art beziehungsweise Sorte. Die Anpassungsgüte der Regressionen wird durch das Quadrat der Korrelationskoeffizienten ( $R^2$ ) abgebildet. Für Abkürzungen von Arten und Sorten siehe Tabelle 1. Erweitert um den Datensatz von 2016 nach Stratopoulos et al., 2019b.

#### 4.4.3 Skalierter Wasserverbrauch pro Quadratmeter Kronen- und Blattfläche

Neben den meteorologischen Variablen zeigte der Xylemfluss in beiden Versuchsjahren auch eine positive Abhängigkeit von der Kronenprojektionsfläche ( $r_s$  2016: 0,56,  $p < 0,01$ ;  $r_s$  2017: 0,50,  $p = 0,05927$ ). Um den Wasserverbrauch von Bäumen mit unterschiedlichen Kronendimensionen vergleichen zu können, wurde der Wasserverbrauch auf den Verbrauch pro Quadratmeter Kronenprojektionsfläche skaliert ( $E_c$ ). Dieser Wert war wiederum positiv mit dem Blattflächenindex (LAI) korreliert ( $r_s$  2016: 0,44,  $p = 0,06501$ ;  $r_s$  2017: 0,31,  $p = 0,3103$ ), was die nachfolgende Skalierung des Wasserverbrauches pro Quadratmeter Blattfläche rechtfertigte ( $E_L$ ). Damit wurde

gezeigt, dass die Kronendimensionen und die Dichte des Bewuchses wichtige Einflussgrößen für die Höhe der zu erwartenden Transpiration sind.

Im Juni waren die  $E_C$ -Werte des Feld-Ahorns mit durchschnittlich  $0,56 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  deutlich niedriger als die der Säulen-Hainbuche mit  $1,95 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  und der Amerikanischen Stadt-Linde mit  $1,42 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  (Abb. 21). Die Säulen-Hainbuche hatte mit  $\pm 0,49 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  eine ähnlich hohe Standardabweichung wie die Amerikanische Stadt-Linde mit  $\pm 0,51 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ , während der Feld-Ahorn mit  $\pm 0,19 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  eine deutlich geringere Abweichung aufwies. Im Juli ergaben sich die stärksten Unterschiede zwischen dem Feld-Ahorn ( $0,57 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ) und der Brabanter Silber-Linde ( $2,45 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ), welche in diesem Monat einen sehr hohen und schwach regulierten Wasserverbrauch aufwies (Kap. 4.4.2), sowie zwischen dem Feld-Ahorn und der Säulen-Hainbuche ( $1,64 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ). Die Hopfenbuche, welche mit  $3,07 \text{ m}^2$  die zweithöchste Kronenprojektionsfläche aufwies (Tabelle 6), hatte ebenfalls deutlich niedrigere Werte ( $0,62 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ) als die sehr schmal wachsende Säulen-Hainbuche und die Brabanter Silber-Linde. Bei den Linden-Sorten, insbesondere bei der Brabanter Silber-Linde, deren Wasserverbrauch pro Einzelbaum bei mehr als  $2 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  über dem Durchschnitt lag, wichen die Beobachtungswerte am stärksten voneinander ab (Amerikanische Stadt-Linde:  $\pm 0,46 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ , Brabanter Silber-Linde:  $\pm 1,32 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ), wohingegen die beiden Ahornarten deutlich homogenere Werteausprägungen aufwiesen (Spitz-Ahorn:  $\pm 0,02 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ , Feld-Ahorn:  $\pm 0,12 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ).

Im Vergleich zur ersten Hälfte des Sommers, waren die Unterschiede bei den  $E_C$ -Werten im Spätsommer geringer. Der Feld-Ahorn und die Hopfenbuche hatten im August mit  $0,52 \pm 0,12 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  und  $0,53 \pm 0,14 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  fast identisch niedrige Werte und Varianzen. Die Brabanter Silber-Linde wies auch in diesem Monat mit Abstand die höchste Streuung der Werte auf ( $\pm 0,9 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ) und die Säulen-Hainbuche mit  $\pm 0,47 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  die zweithöchste. Auch im September verbrauchten Feld-Ahorn und Hopfenbuche mit  $0,26 \pm 0,07 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  und  $0,25 \pm 0,09 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  fast identisch viel Wasser auf den Quadratmeter Kronenfläche und hatten damit einen deutlich niedrigeren Wasserverbrauch und deutlich homogenere Werteausprägungen als die Säulen-

Hainbuche mit  $0,64 \pm 0,19 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  und die Brabanter Silber-Linde mit  $0,62 \pm 0,36 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ .

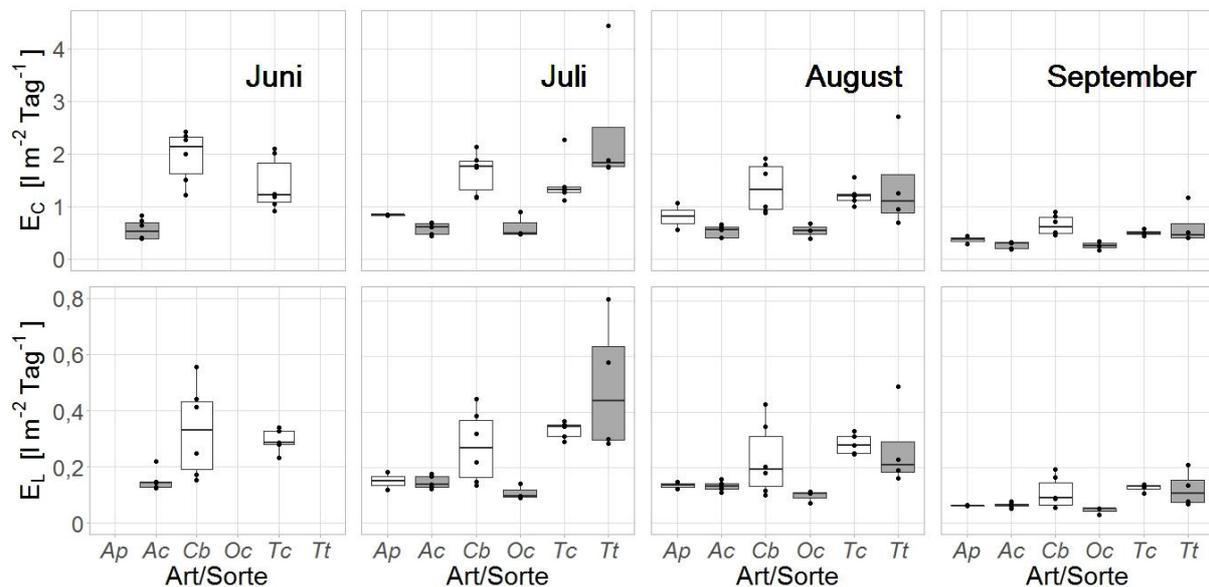


Abbildung 21. Wasserverbrauch pro Quadratmeter Kronen- und Blattfläche der sechs Arten und Sorten im Sommer 2016. Aufgrund des späteren Messbeginns fehlen die Juni-Daten bei Quartier B. Für Abkürzungen von Arten und Sorten siehe Tabelle 1. Verändert nach Stratópoulos et al., 2018.

Auch beim Wasserverbrauch pro Quadratmeter Blattfläche ( $E_L$ ) waren die Juni-Werte des Feld-Ahorns mit  $0,15 \pm 0,04 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  am niedrigsten und wiesen die geringste Streuung auf. Die Werte der Säulen-Hainbuche und der Amerikanischen Stadt-Linde lagen mit  $0,33 \pm 0,16 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  und  $0,29 \pm 0,04 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  dichter beieinander. Die Säulen-Hainbuche wies erneut eine starke Streuung auf, wohingegen die Amerikanische Stadt-Linde ähnlich homogene Werte wie der Feld-Ahorn verzeichnete. Diese starke Streuung war maßgeblich der hohen Varianz der LAI-Werte geschuldet (Tabelle 6). In den zwei nachfolgenden Monaten Juli und August verbrauchten die beiden Linden-Sorten am meisten Wasser pro Quadratmeter Blattfläche, gefolgt von der Säulen-Hainbuche. Im Vergleich zu den  $E_C$ -Werten wies die Amerikanische Stadt-Linde dieses Mal höhere  $E_L$ -Werte als die Säulen-Hainbuche auf, da ihre LAI-Werte deutlich geringer waren. Die beiden Ahornarten und die Hopfenbuche wiesen allesamt ähnlich niedrige Werte auf. Für den September konnten ähnliche Tendenzen erfasst werden, obgleich das Wertenniveau allgemein deutlich niedriger war.

Über den gesamten Sommer hinweg - ausgenommen des Monats Juni, indem nicht für alle sechs Arten und Sorten Werte verfügbar waren - hatte die Hopfenbuche aufgrund ihres stark regulierten Wasserverbrauches (Kap. 4.4.2) deutlich geringere  $E_C$ - und  $E_L$ -Werte als die verwandte Säulen-Hainbuche. Beim Ahorn-Vergleichspaar waren die Unterschiede im Allgemeinen sehr gering. Die  $E_C$ - und  $E_L$ -Werte des Spitz-Ahorns lagen über denen des Feld-Ahorns, bis auf eine Ausnahme im September, in dem die  $E_L$ -Werte des Feld-Ahorns geringfügig höher waren ( $0,06 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  und  $0,07 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ). Bei der Brabanter Silber-Linde reduzierte sich infolge der stärkeren Regulation (siehe vorhergehendes Kapitel) der Wasserverbrauch merklich im Spätsommer, wodurch sie im August und September auch niedrigere  $E_L$ -Werte als die Amerikanische Stadt-Linde aufwies; früher im Sommer verbrauchte sie allerdings deutlich mehr Wasser als die Amerikanische Stadt-Linde. Skaliert auf die für dieses Experiment kleinstmögliche Untersuchungsebene betragen die  $E_L$ -Werte der Arten und Sorten gemittelt über den Sommer 2016: Brabanter Silber-Linde:  $0,30 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  > Amerikanische Stadt-Linde:  $0,25 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  > Säulen-Hainbuche:  $0,20 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  > Spitz- und Feld-Ahorn: jeweils  $0,12 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  > Hopfenbuche:  $0,08 \text{ l m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ . Insgesamt waren die  $E_C$ - und  $E_L$ -Werte der Arten und Sorten aus dem frischeren Lebensbereich um das 1,26-fache beziehungsweise um das 1,12-fache höher als die der Arten und Sorten aus dem trockeneren Lebensbereich.

---

### *Zwischenfazit:*

- Bäume aus Lebensbereich (LB) 6 zeigten bei vergleichbarer Biomasse einen **niedrigeren Wasserverbrauch** als Bäume aus LB 3. Bei der Brabanter Silber-Linde, welche auf der Wurzelunterlage der heimischen Sommer-Linde veredelt wurde, war diese Beobachtung jedoch nicht gültig.
  - Der durchschnittlich niedrigere Wasserverbrauch der Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern kann durch eine **stärkere Regulation der Transpiration bei hoher atmosphärischer Trockenheit** erklärt werden. Die Amerikanische Stadt-Linde zeigte das geringste Haushalten mit Wasser, während die nicht-heimische Hopfenbuche die empfindlichste Regulation aufwies.
  - Bei intensiver Trockenheit wies die Amerikanische Stadt-Linde die niedrigste Resistenz im Wasserverbrauch auf, was ihr Kühlpotenzial stark reduzierte.
-

---

➔ Die Ergebnisse der Belaubung und des Wasserverbrauches zeigen, dass die untersuchten **Arten und Sorten aus dem frischeren LB ein höheres Kühlpotenzial aufweisen als die Arten und Sorten aus dem trockeneren LB. Diese Aussage beschränkt sich jedoch auf Wuchssituationen ausreichender Bodenwasserverfügbarkeit.** Bei langanhaltender Trockenheit können Gehölze aus LB 6 aufgrund ihrer höheren Resistenzen ein höheres Kühlpotenzial aufweisen.

---

#### 4.5 Durchmesserwachstum im Jahresverlauf

##### *Kontrolle*

Die Brabanter Silber-Linde zeigte im Jahr 2016 mit  $21,3 \pm 4,38$  % das höchste relative Gesamtjahreswachstum und die höchste Wertestreuung, die Säulen-Hainbuche mit  $8,35 \pm 1,32$  % hingegen das niedrigste relative Gesamtjahreswachstum und die niedrigste Wertestreuung (Abb. 22). Ein Jahr später hatte die Säulen-Hainbuche wiederum mit  $12,8 \pm 2,00$  % den höchsten Gesamtwuchs aller Arten und Sorten und nach dem Feld-Ahorn die zweithöchste Wertestreuung. Hier verzeichnete die Amerikanische Stadt-Linde mit  $4,83 \pm 0,5$  % das niedrigste Wachstum und nach der Brabanter Silber-Linde ( $\pm 0,37$  %) die zweitniedrigste Wertestreuung.

Das Hauptwachstum der Säulen-Hainbuche konzentrierte sich in beiden Jahren auf den Früh- bis Hochsommer - die Zeit nach der Blüte und Blattentfaltung im Zeitraum April bis Mai - mit Maximalwerten jeweils im Juli und einer abfallenden Tendenz in den darauffolgenden Monaten. Noch einheitlicher war der Wachstumsverlauf der Amerikanischen Stadt-Linde in beiden Versuchsjahren. Als einzige der sechs Arten und Sorten wies sie 2016 und 2017 jeweils ein Maximum im Mai auf mit einer Tendenz zu absinkenden Werten in den darauffolgenden Sommer- und Herbstmonaten, in denen allgemein kaum mehr ein Zuwachs zu verzeichnen war. Dies entspricht den Beobachtungen, die auch bezüglich des Wasserverbrauches im Jahresverlauf gemacht wurden (Kap. 4.4.1). Die Amerikanische Stadt-Linde zeigte somit ihr Hauptwachstum noch vor Beginn des meteorologischen Sommeranfangs am 01. Juni und vor dem Einsetzen der Blüte im Zeitraum Juni bis Juli (Roloff & Bärtels, 2014, S. 690) und anschließender Fruchtbildung. Die beiden Ahorne, welche vor (Spitz-Ahorn) beziehungsweise während (Feld-Ahorn) der Blattentfaltung im Frühjahr blühen (Roloff &

Bärtels, 2014, S. 72, 85), zeigten einen Wachstumsschub später im Jahr: sie erreichten ihre jeweiligen mittleren Maxima 2016 im Juli und 2017 im August, dem Monat, in dem der Spitz-Ahorn auch ein deutliches Maximum beim Wasserverbrauch gezeigt hatte (Kap. 4.4.1). Bei der südeuropäischen Hopfenbuche und der südosteuropäischen Brabanter Silber-Linde waren die Jahresgänge des Wachstums weniger einheitlich: sie hatten 2016 ihre Wuchsmaxima relativ früh im Jahr (Hopfenbuche: Mai, Brabanter Silber-Linde: Juni), 2017 hingegen erst im August, wie auch die Ahorne. Die Hopfenbuche blüht gewöhnlich im Zeitraum April bis Mai (Roloff & Bärtels, 2014, S. 461), die Brabanter Silber-Linde hingegen von Juli bis August (Roloff & Bärtels, 2014, S. 695). Es war in diesen Fällen also kein Trend erkennbar, ob das Hauptwachstum vor, während oder nach der Blüte auftritt.

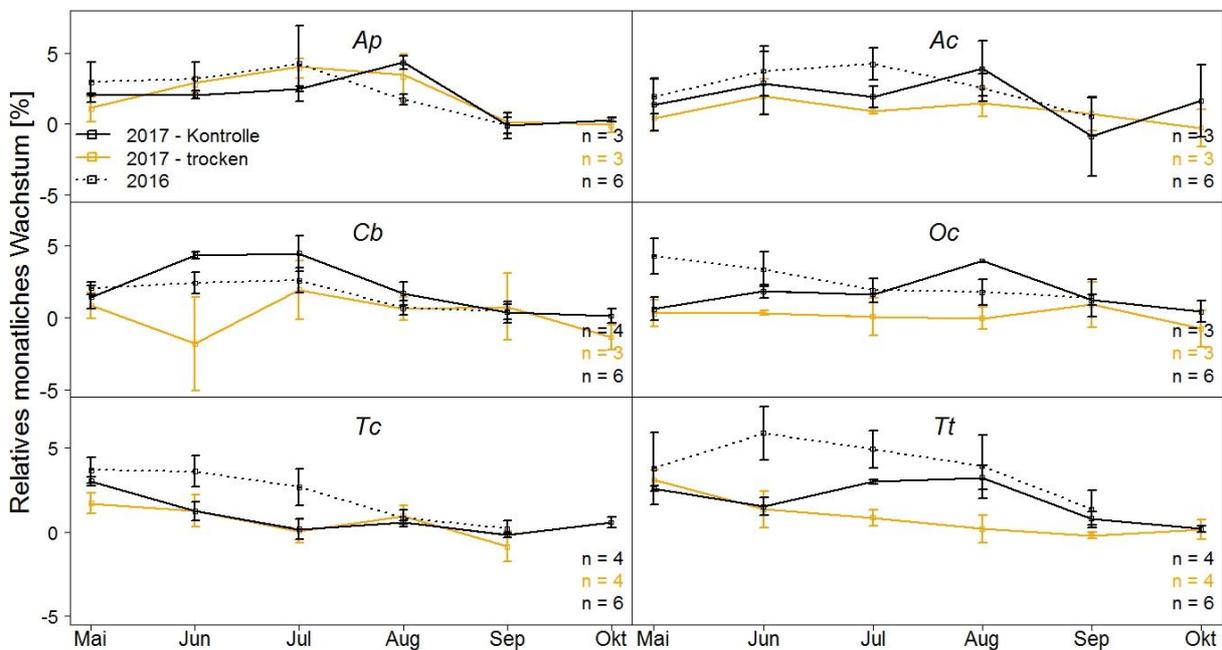


Abbildung 22. Relatives monatliches Stammwachstum der sechs Arten und Sorten in der Kontrolle (schwarz) und der Trockenvariante (orange) im Jahr 2017. Die Linien zeigen die Mittelwerte der jeweiligen Gruppe, Standardabweichungen sind als Fehlerbalken sichtbar. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

Die Unterschiede im Durchmesserwachstum zwischen den sechs Arten und Sorten waren im ersten Versuchsjahr hochsignifikant ( $p < 0,001$ ; Tabelle 8). Einen etwas schwächeren, aber dennoch starken Einfluss ( $p = 0,0026$ ) hatte auch die Zugehörigkeit

zu den Lebensbereichen insofern als dass die Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern im Schnitt um 0,27 cm stärker wuchsen als die Arten und Sorten aus dem frischeren Lebensbereich.

Im trockeneren Jahr 2017 waren die Unterschiede im Wachstum zwischen den sechs Arten und Sorten ebenfalls signifikant ( $p = 0,0323$ ), jedoch deutlich schwächer ausgeprägt als im ersten Versuchsjahr. Die Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern wuchsen im Schnitt um 0,12 cm stärker, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant ( $p = 0,1486$ ). Im Unterschied zum ersten Versuchsjahr, verzeichneten Säulen-Hainbuche und Hopfenbuche mit  $0,65 \pm 0,09$  cm den stärksten mittleren Zuwachs, gefolgt von den Ahornen mit  $0,59 \pm 0,19$  und den Linden mit  $0,52 \pm 0,26$  cm.

Was den Zusammenhang zwischen dem monatlichem Durchmesserwachstum und den mittleren Monatstemperaturen beziehungsweise Niederschlagssummen betrifft, konnten insgesamt positive, jedoch nur insignifikante Korrelationen ermittelt werden. Die einzige Ausnahme bildete die Brabanter Silber-Linde, bei der höhere Niederschläge zu einer signifikanten ( $p = 0,03816$ ) Zunahme des Stammzuwachses geführt hatten. Anders als bei den monatlichen Werten, war das kontinuierlich gemessene Stammwachstum der Linden in elf von zwölf Fällen höchst signifikant ( $p < 0,001$ ) negativ mit der vorherrschenden Temperatur korreliert. Dasselbe Bild zeigte sich bei der Korrelation der Durchmesseränderungen mit dem Sättigungsdefizit der Luft (VPD).

Bei den Niederschlägen waren die Unterschiede größer zwischen den Sorten: die Amerikanische Stadt-Linde zeigte in allen Fällen nur sehr schwache, insignifikante Zusammenhänge, wohingegen die Brabanter Silber-Linde in zwei Fällen signifikant stärker wuchs, je mehr Niederschlag fiel. Alle sechs mit Dendrometern versehenen Bäume, deren Wurzelraum durch die Regenausschluss-Konstruktionen ausgetrocknet wurde, zeigten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen Durchmesserwachstum und gefallenem Niederschlagsmengen, was den Erfolg des Trockenstressexperimentes bestätigt. Wie bereits bei der Temperatur und beim VPD beobachtet, zeigten bei zunehmender Strahlung im sichtbaren Wellenlängenspektrum (PAR) elf von zwölf Individuen eine höchst signifikante Abnahme der Stammdurchmesser. In dem abweichenden Einzelfall war der Zusammenhang ebenfalls höchst signifikant, jedoch

positiver Natur. Es handelte sich um das Individuum *Tt* 6, bei dem das Dendrometer erst in der zweiten Juni-Hälfte installiert wurde und sich aufgrund dessen ein negativer Wuchstrend im Vergleich zur Referenzmessung am ersten Messtag abzeichnete.

### *Trockenvariante*

Die Bodenaustrocknung im Rahmen des Regenausschlussexperimentes im Jahr 2017 führte insgesamt zu Wachsminderungen, welche höchst signifikant waren ( $p < 0,001$ ; Tabelle 8). Von Mai bis Oktober 2017 zeigten die Kontrollbäume ein durchschnittliches Durchmesserwachstum von 0,58 cm, wohingegen Bäume, deren Wurzelzonen ausgetrocknet wurden, durchschnittlich nur 0,28 cm wuchsen, was einem Rückgang von 48 % entspricht. Dieser war bei den Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern mit durchschnittlich 0,39 cm höher als bei den Arten und Sorten aus dem frischeren Lebensbereich (0,22 cm). Auch beim paarweisen Vergleich hatten erstere in jedem der drei Fälle stärkere Wachsminderungen. Gleichzeitig wiesen aber die am nächsten verwandten Arten beziehungsweise Sorten auch die ähnlichsten Resistenzwerte auf: Der Spitz-Ahorn zeigte mit 1,06 die höchste Resistenz und ein sogar um 0,04 cm höheres Durchmesserwachstum in der Trockenvariante. Der Feld-Ahorn zeigte die zweithöchste Resistenz (0,6), die beiden Linden-Sorten eine mittlere Resistenz (Amerikanische Stadt-Linde: 0,52; Brabanter Silber-Linde: 0,46) und Säulen-Hain- und Hopfenbuche die niedrigste Resistenz gegenüber Trockenheit mit 0,19 und 0,15.

In sehr starkem Maße verzeichneten die Säulen-Hainbuche und die Hopfenbuche bereits im warmen Juni Wachstumseinbrüche (Abb. 22). Bei der Brabanter Silber-Linde hingegen zeigte sich ein negativer Effekt der Bodenaustrocknung erst im Juli. Die Amerikanische Stadt-Linde wies auch in der Trockenvariante den typischen Verlauf mit Maximalwerten im Mai und einer Tendenz zu schrittweise niedrigeren Werten in den darauffolgenden Monaten auf. Gleichzeitig erlitt sie in diesem Monat aber auch die höchsten Wachsminderungen im Jahr. Im Sommer und Herbst fielen diese vor allem deshalb niedrig aus, weil auch die Kontrolle nach Juni kaum mehr ein Wachstum gezeigt hat.

Tabelle 8. Deskriptive Statistik, Resistenzen und Mittelwertvergleiche zum Durchmesserwachstum für die Faktoren Art/Sorte und Lebensbereich (LB) für den Zeitraum Mai bis Oktober. Signifikant unterschiedliche Gruppen haben unterschiedliche Buchstaben. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

<b>Durchmesserwachstum 2016</b>												
<b>Art/Sorte</b> <i>&lt; 0,001***</i>	n	M	± SD	Min/Max	Med		<b>LB</b> <i>0,0026**</i>	N	M	± SD	Min/Max	Med
<i>Ap<sup>ab</sup></i>	6	0,64	0,15	0,47/0,88	0,63		LB 3 <sup>b</sup>					
<i>Ac<sup>ab</sup></i>	6	0,65	0,18	0,40/0,87	0,64			18	0,55	0,14	0,35/0,88	0,55
<i>Cb<sup>b</sup></i>	6	0,42	0,07	0,35/0,54	0,41							
<i>Oc<sup>ab</sup></i>	6	0,68	0,20	0,41/0,88	0,74		LB 6 <sup>a</sup>					
<i>Tc<sup>ab</sup></i>	6	0,59	0,07	0,50/0,70	0,58			18	0,82	0,29	0,40/1,42	0,81
<i>Tt<sup>a</sup></i>	6	1,12	0,22	0,81/1,42	1,13							

<b>Durchmesserwachstum 2017</b>															
<b>Art/Sorte</b> <i>0,0323*</i>		n	M	± SD	Min/Max	Med	<i>R<sub>tk</sub></i>	<b>LB</b> <i>0,1486</i>		n	M	± SD	Min/Max	Med	
<i>Ap<sup>ab</sup></i>	K	3	0,64	0,08	0,57/0,72	0,64	1,06	LB 3 <sup>a</sup>	K	11	0,53	0,20	0,25/0,79	0,57	
	t	3	0,68	0,20	0,55/0,91	0,59									
<i>Ac<sup>ab</sup></i>	K	3	0,53	0,27	0,29/0,83	0,48	0,60		t	11	0,31	0,31	-0,17/0,91	0,26	
	t	3	0,32	0,12	0,21/0,44	0,30									
<i>Cb<sup>ab</sup></i>	K	4	0,68	0,11	0,55/0,79	0,69	0,19		LB 6 <sup>a</sup>	K	10	0,65	0,17	0,29/0,83	0,70
	t	3	0,13	0,26	0,17/0,29	0,28									
<i>Oc<sup>ab</sup></i>	K	3	0,60	0,06	0,54/0,65	0,62	0,15	t		10	0,26	0,14	0,01/0,44	0,30	
	t	3	0,09	0,09	0,01/0,19	0,08									
<i>Tc<sup>b</sup></i>	K	4	0,29	0,03	0,25/0,32	0,29	0,52	K		10	0,65	0,17	0,29/0,83	0,70	
	t	4	0,15	0,09	0,03/0,24	0,17									
<i>Tt<sup>a</sup></i>	K	4	0,76	0,01	0,75/0,77	0,77	0,46	t	10	0,26	0,14	0,01/0,44	0,30		
	t	4	0,35	0,04	0,30/0,40	0,34									

**Behandlung** < 0,001 \*\*\*

Abkürzungen: \* : signifikant ( $p < 0,05$ ), \*\* : sehr signifikant ( $p < 0,01$ ), \*\*\* : hochsignifikant ( $p < 0,001$ ),  $R_{tk}$ : Resistenz, K: Kontrolle, t: Trockenvariante, für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1, für Statistikparameter siehe Abkürzungsverzeichnis.

Dass bei der Brabanter Silber-Linde im Vergleich zur Amerikanischen Stadt-Linde eine stärkere Wuchsdepression durch die Bodenaustrocknung stattgefunden hat, wurde auch gut anhand der Dendrometerdaten deutlich (Abb. 23; siehe folgendes Kapitel). Bei einer Brabanter Silber-Linde kam es sogar zu einem deutlichen Schrumpfen des Stammdurchmessers.

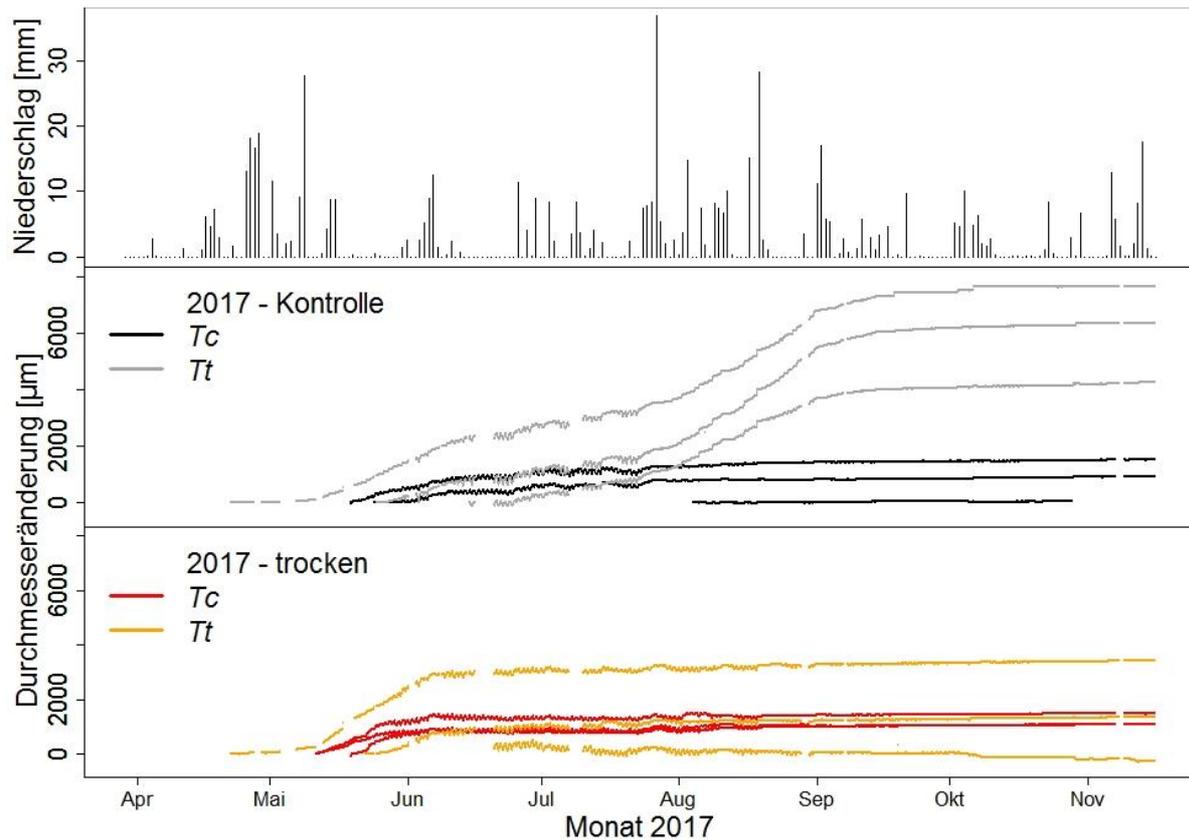


Abbildung 23. Kontinuierliche Änderungen der Stammdurchmesser der Linden mit täglichen Niederschlagssummen im Jahresverlauf 2017 für jeweils drei Bäume der beiden Behandlungsgruppen Kontrolle (grau/schwarz) und Trockenvariante (orange/rot). Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

#### 4.6 Tagesdynamiken der Xylemfluss- und Dendrometerwerte

##### *Kontrolle*

Prinzipiell zeigten alle Arten und Sorten in beiden Behandlungsvarianten dieselbe Tagesdynamik der Xylemflussdichte ( $J_S$ ) (Abb. 24-26). In den Morgenstunden stiegen die  $J_S$ -Werte mit zunehmender Sonneneinstrahlung kontinuierlich an bis zum Mittag, erreichten bis spätestens zum Nachmittag ein Maximum (zwischen 12:20 und 14:30 Uhr) und fielen dann bis zum Abend wieder ab, wo sie bis zu nächsten Morgen auf einem sehr niedrigen Wertenniveau verblieben.

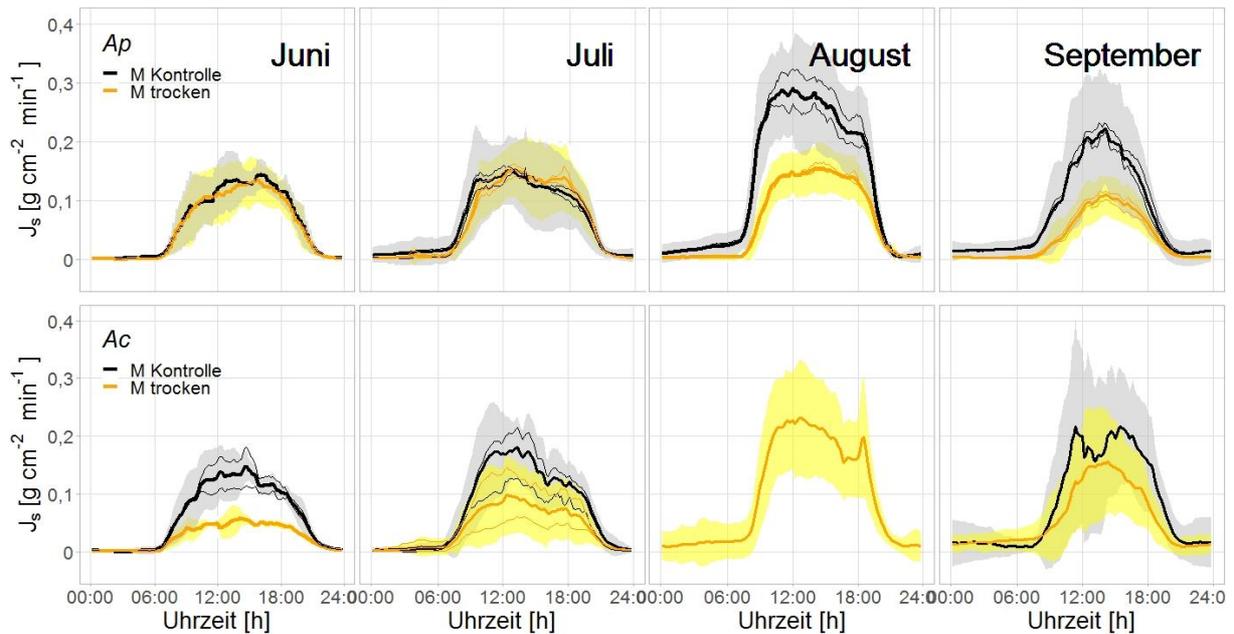


Abbildung 24. Tagesdynamik der Xylemflussdichte von Spitz- und Feld-Ahorn in den Sommermonaten des Jahres 2017. Die Kurven zeigen Mittelwerte von bis zu drei Bäumen pro Sorte und Behandlung (dicke Kurven) als auch Tagesgänge für Einzelbäume (dünne Kurven). Die grauen und gelben Bänder repräsentieren die Standardabweichung der mittleren Tagesgänge der Xylemflussdichte ( $J_s$ ) für den jeweiligen Monat und die jeweilige Behandlungsvariante. Für Artenkürzel siehe Tabelle 1.

Die größten Unterschiede zwischen den  $J_s$ -Werten der einzelnen Arten und Sorten ergaben sich zu der Zeit der höchsten potentiellen Evapotranspiration am Tag, als die die Bäume am meisten Wasser verbrauchten. Gemittelt über den gesamten Sommer waren die täglichen Maximalwerte von  $J_s$  der Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern (LB 6) um das 1,14-fache höher als bei den Bäumen aus artenreichen Wäldern und Gehölzgruppen (LB 3) (Tagesmaxima  $J_s$  LB 6:  $0,17 \text{ g cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ , LB 3:  $0,15 \text{ g cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ). Der Unterschied war jedoch nicht signifikant ( $p = 0,4$ ). Einzig bei der direkten Gegenüberstellung von Amerikanischer Stadt-Linde und Brabanter Silber-Linde waren die durchschnittlichen täglichen Maxima signifikant unterschiedlich (Tagesmaximum  $J_s$  Amerikanische Stadt-Linde:  $0,11 \text{ g cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ , Brabanter Silber-Linde:  $0,2 \text{ g cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$ ;  $p = 0,02$ ) (Abb. 26). Die Amerikanische Stadt-Linde wies die niedrigsten Werte aller Arten und Sorten auf. Die höchsten Tagesmaxima mit durchschnittlich  $0,21 \text{ g cm}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  wurden beim Spitz-Ahorn gemessen (Abb. 24).

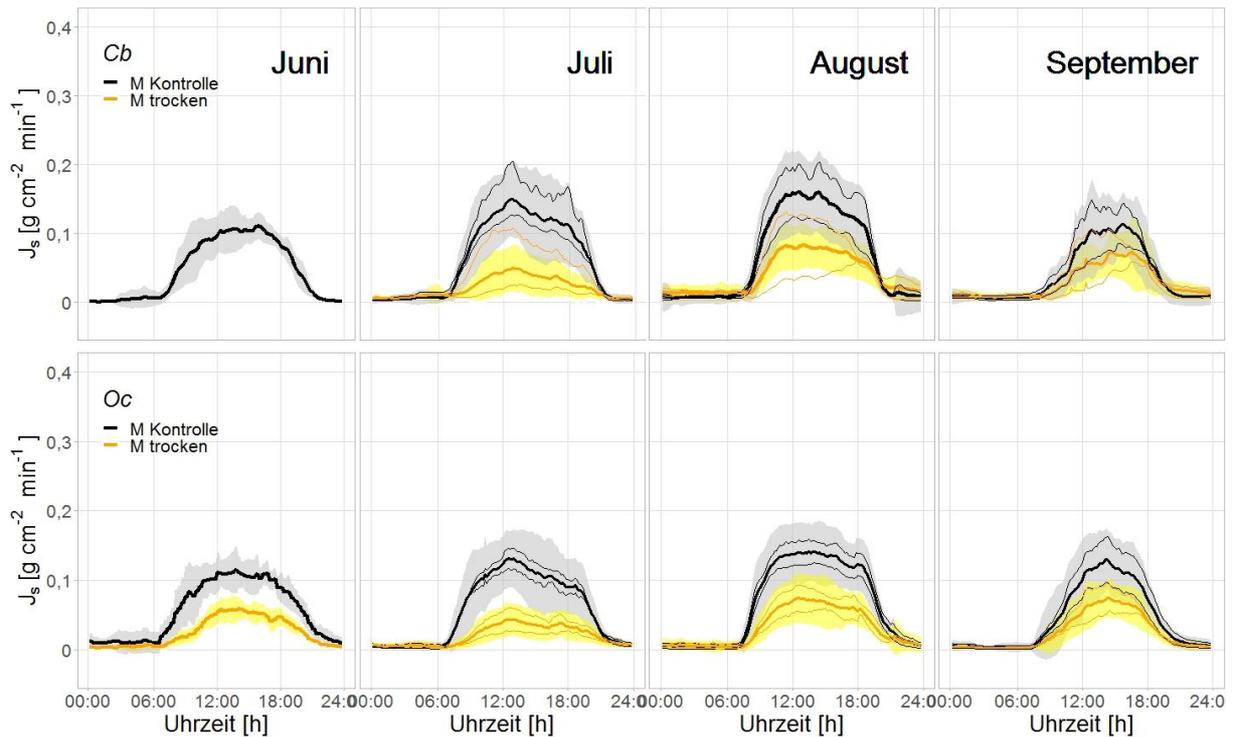


Abbildung 25. Tagesdynamik der Xylemflussdichte von Säulen-Hainbuche und Hopfenbuche in den Sommermonaten des Jahres 2017. Die Kurven zeigen Mittelwerte von bis zu vier Bäumen pro Sorte und Behandlung (dicke Kurven) als auch Tagesgänge für Einzelbäume (dünne Kurven). Die grauen und gelben Bänder repräsentieren die Standardabweichung der mittleren Tagesgänge der Xylemflussdichte ( $J_s$ ) für den jeweiligen Monat und die jeweilige Behandlungsvariante. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

Abbildung 26 zeigt die negative Korrelation zwischen  $J_s$  und den Stammdurchmessern bei dem Linden-Vergleichspaar (siehe Kap. 2.3.3). Die stärksten tageszeitlichen Dickenschwankungen wurden im deutlich zu trockenen und warmen Juni gemessen und verringerten sich schrittweise in Richtung Herbst bei beiden Sorten. Grundsätzlich fielen die Tagesschrumpfungen der Durchmesser bei der Brabanter Silber-Linde höher aus als bei der Amerikanischen Stadt-Linde. Dieses Ergebnis war zunächst auch nicht weiter erstaunlich, da die Brabanter Silber-Linde deutlich größere Stammdurchmesser als die Amerikanische Stadt-Linde aufwies (Tabelle 2).

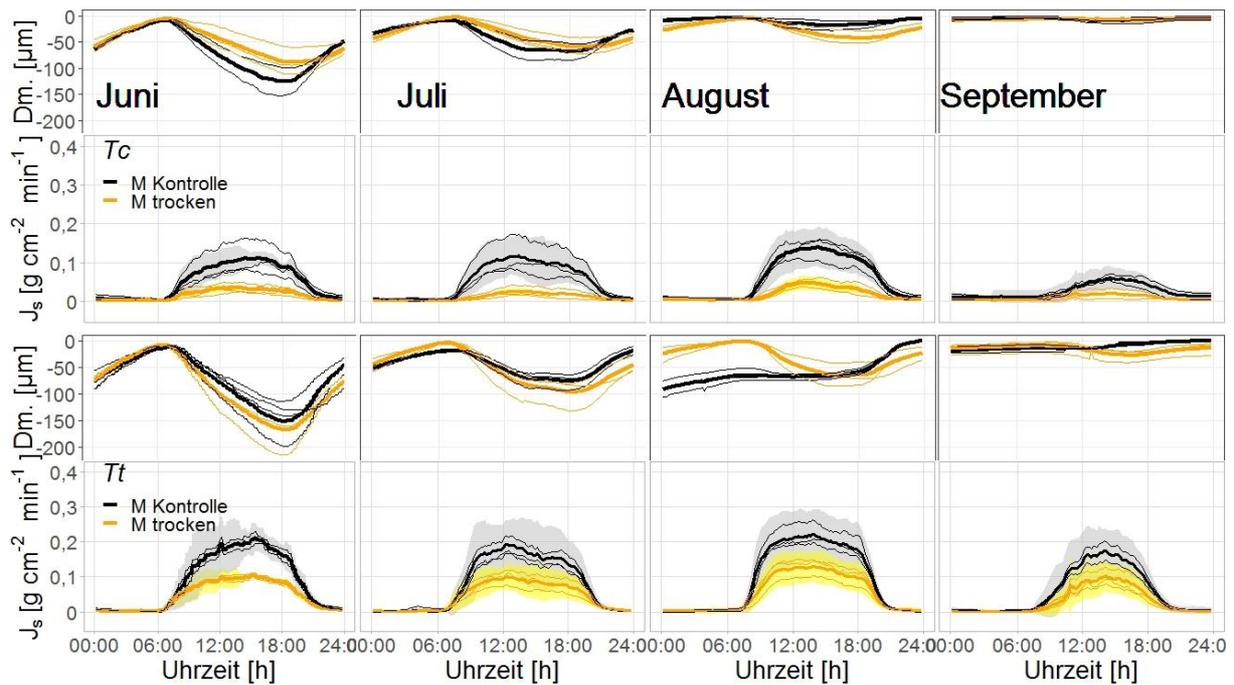


Abbildung 26. Tagesdynamik der Xylemflussdichte und der Stammdurchmesser von Amerikanischer Stadt-Linde und Brabanter Silber-Linde in den Sommermonaten des Jahres 2017. Die Kurven zeigen Mittelwerte von bis zu vier Bäumen pro Sorte und Behandlung (dicke Kurven) als auch Tagesgänge für Einzelbäume (dünne Kurven). Die grauen und gelben Bänder repräsentieren die Standardabweichung der mittleren Tagesgänge der Xylemflussdichte ( $J_s$ ) für den jeweiligen Monat und die jeweilige Behandlungsvariante. Für Sortenkürzel siehe Tabelle 1. Um die Standardabweichung erweitert und verändert nach Stratópoulos et al., 2019b.

### Trockenvariante

Zwischen 12:20 und 14:30 Uhr – dem Zeitraum, in dem die  $J_s$ -Werte ihr Maximum erreichten – kam es zu den höchsten Unterschieden im Wasserverbrauch zwischen Kontrolle und Trockenvariante. Außerdem war zu erkennen, dass Bäume in der Trockenvariante häufig einen verzögerten Transpirationsanstieg in den Morgenstunden aufwiesen, was sehr ausgeprägt sichtbar war beim Spitz-Ahorn im Spätsommer (Abb. 24) und bei Säulen-Hainbuche und Hopfenbuche (Abb. 25) über den gesamten Sommer. Teilweise zeigte sich auch ein frühzeitiger Abfall der Transpiration am späten Nachmittag beziehungsweise Abend, was ausgeprägt sichtbar wurde bei allen drei Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern. Im Extremfall – wie es zu beobachten war bei der Amerikanischen Stadt-Linde im Juli – kam es mit Tagesanbruch jedoch zu gar keinem merklichen Abstieg des Xylemflusses, sondern der Wasserverbrauch verlief beinahe auf nächtlichem Niveau nahe null.

Bezüglich der tageszeitlichen Dickenschwankungen waren bei der Amerikanischen Stadt-Linde im Mittel die Unterschiede zwischen den zwei Behandlungsvarianten geringer als bei der Brabanter Silber-Linde. Im Juni und Juli zeigten die Kontrollpflanzen sogar höhere Schrumpfungen als die ausgetrockneten Pflanzen, bei der Brabanter Silber-Linde war es anders herum. Im Juni schrumpften bei der Trockenvariante die Stammdurchmesser bis zu 167,9  $\mu\text{m}$  (Mittelwert) und im Einzelfall sogar bis zu 214,5  $\mu\text{m}$ , wohingegen es bei der Amerikanischen Stadt-Linde nur zu einer Maximalvariation am Tag von 88,5  $\mu\text{m}$  kam.

---

### *Zwischenfazit:*

- Arten und Sorten aus Lebensbereich (LB) 6 zeigten unter langanhaltender Trockenheit im Mittel **höhere Wachstumseinbußen** als Arten und Sorten aus LB 3. Ihre Transpiration blieb jedoch auf einem höheren Niveau, was auf eine **Investition des Kohlenstoffs in die unterirdische Wurzelbiomasse** hindeutet.
- Eine starke **Nutzung des stammintern gespeicherten Wassers** führte bei der Brabanter Silber-Linde zu den hohen Resistenz-Werten bei der Transpiration.

➔ Die **Anpassungen** an Trockenheit, die bei den Arten und Sorten aus LB 6 auftreten, gehen **bei langanhaltender Dürre zu Lasten des oberirdischen Wachstums**. Gleichzeitig ermöglichen sie jedoch eine **höhere Transpiration und verhindern frühzeitigen Blattfall**, wodurch z.T. ein **höheres Kühlpotenzial** gegeben ist als bei Arten und Sorten aus LB 3.

---

## 4.7 Wassernutzungseffizienz

Im Zeitraum Juli bis September 2016, für den Wachstums- und Saftflussdaten für alle sechs Arten und Sorten vorlagen, hatten die drei Arten und Sorten aus dem Lebensbereich Steppengehölze und Trockenwälder eine höhere WUE als die Arten und Sorten aus artenreichen Wäldern und Gehölzgruppen. Die Hopfenbuche zeigte mit  $2,36 \pm 1,86 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$  über die Monate gemittelt den effektivsten Wasserverbrauch, gefolgt von der Brabanter Silber-Linde mit  $2,23 \pm 0,95 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$  und dem Feld-Ahorn mit  $1,24 \pm 0,84 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ . Beim Spitz-Ahorn und der Säulen-Hainbuche ergaben sich WUEs leicht unter der des Feld-Ahorns mit  $1,21 \pm 1,21 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$  beziehungsweise  $1,16 \pm 0,68 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ . Die niedrigste WUE wurde bei der Amerikanischen Stadt-Linde gemessen mit nur  $1,01 \pm 0,95 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ .

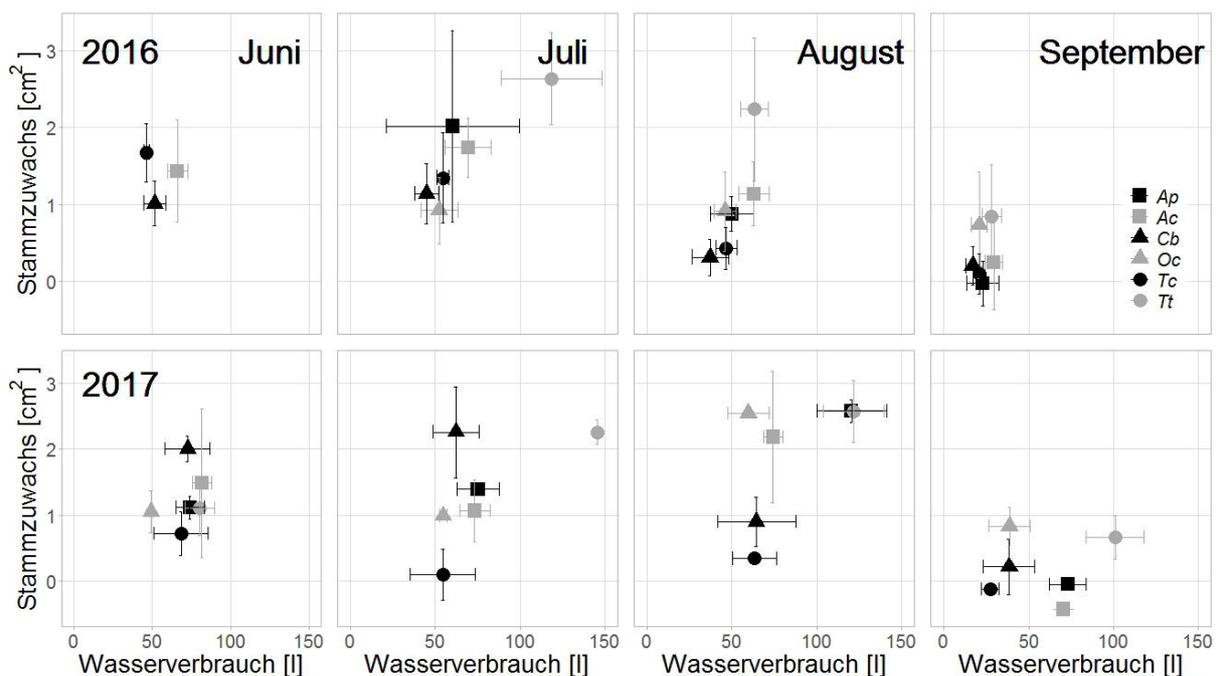


Abbildung 27. Monatliche Stammzuwächse und Wasserverbrauch in den Sommermonaten 2016 und 2017. Jeder Datenpunkt im Diagramm repräsentiert den Mittelwert pro Art beziehungsweise Sorte, die Standardabweichungen der beiden Parameter sind sichtbar durch die Fehlerbalken. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1. Um Datensätze für Juni 2016 und den Sommer 2017 erweitert und verändert nach Stratópoulos et al., 2018.

Aufgrund ihres relativ starken Wachstums früh im Sommer (Juni:  $1,69 \text{ cm}^2$ ; Juli:  $1,32 \text{ cm}^2$ ; Kap. 4.5) und einem vergleichsweise niedrigen Wasserverbrauch (Juni:  $46,39 \text{ l}$ ; Juli:  $54,64 \text{ l}$ ) (Abb. 27), konnte die Amerikanische Stadt-Linde jedoch im Juni ( $3,61 \pm 0,81$

cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>) und Juli (2,60 ± 1,05 cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>) die höchste WUE aller Arten und Sorten erreichen (Abb. 28). Allerdings kann für den Juni nur der Vergleich zum Feld-Ahorn (2,22 ± 1,05 cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>) und zur Säulen-Hainbuche (2,03 ± 0,81 cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>) gezogen werden, da zu diesem Zeitpunkt noch keine Messungen des Xylemflusses auf Quartier B durchgeführt wurden. Im August und September führten hingegen dann schwache Wuchsraten (August: 0,43 cm<sup>2</sup>, September: 0,09 cm<sup>2</sup>) und ein moderater Wasserverbrauch (August: 46,64 l, September: 20,86 l) zur der zweitniedrigsten WUE aller Arten und Sorten. Die nichtheimische Brabanter Silber-Linde und Hopfenbuche wiesen im Juli zunächst die niedrigsten WUEs auf (2,18 und 2,16 cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>). Bei der Brabanter Silber-Linde lag dies an dem sehr hohen Wasserverbrauch von 118,77 l, der somit mehr als das 2,5-fache des Wasserverbrauches der Säulen-Hainbuche mit 45,11 l betrug. Bei der Hopfenbuche lag es an dem sehr niedrigen Wachstum (0,92 cm<sup>2</sup>), welches in diesem Monat mit Abstand das niedrigste aller Arten und Sorten war. In entgegengesetzter Weise zu der Amerikanischen Stadt-Linde verzeichnete die Hopfenbuche jedoch dann im August und September einen überdurchschnittlich hohen Zuwachs (0,91 cm<sup>2</sup> und 0,72 cm<sup>2</sup>) bei gleichzeitig niedrigem Wasserverbrauch (46,17 l und 20,82 l). Dies führte im September 2016 zu dem höchst gemessenen WUE-Wert aller Arten und Sorten im gesamten Zweijahresexperiment von 5,52 ± 3,1 cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>. Bei der Brabanter Silber-Linde waren es eine Kombination aus einem hohen Wasserverbrauch (63,24 l und 28,32 l) mit umso höheren Zuwächsen (2,24 cm<sup>2</sup> und 0,84 cm<sup>2</sup>), die dafür sorgte, dass sie im August die höchste und im September die zweithöchste WUE hatte. Ihr durchschnittlicher Zuwachs von 2,24 cm<sup>2</sup> im August war über fünfmal so hoch wie der der Amerikanischen Stadt-Linde und sogar mehr als siebenmal so hoch wie der der Säulen-Hainbuche (0,31 cm<sup>2</sup>), während sich die Transpirationen mit nur dem 1,7-fachen Wert der Säulen-Hainbuche nicht in demselben Maße unterschieden. In den Monaten Juli bis September 2016 zeigte die Säulen-Hainbuche jeweils den niedrigsten Wasserverbrauch (Juli: 45,11 l; August: 37,16 l; September: 17,08 l) und moderates (Juli: 1,14 cm<sup>2</sup>; September: 0,20 cm<sup>2</sup>) bis sehr niedriges Wachstum (August: 0,31 cm<sup>2</sup>) im Vergleich zu den anderen Arten und Sorten, was auch bei dieser Sorte zu hohen Schwankungen der WUE über den Sommer geführt hat. Die Bandbreite reichte von einer hohen WUE im Juli (2,48 cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>), über eine mittlere WUE im September (1,02 cm<sup>2</sup> 100 l H<sub>2</sub>O<sup>-1</sup>)

bis zu einer sehr niedrigen WUE im August ( $0,89 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ). Im Juli war die hohe WUE in einem starken Wachstum und einem ebenfalls starken Wasserverbrauch begründet. Im August verschlechterte sich dann die Bilanz aufgrund eines relativ niedrigen Zuwachses ( $0,88 \text{ cm}^2$ ). Da der Spitz-Ahorn im September ein Schrumpfen der Stammdurchmesser aufwies ( $-0,03 \text{ cm}^2$ ) erreichte er auch die niedrigste WUE aller Arten und Sorten mit  $-0,50 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ . Der Feld-Ahorn hatte schließlich die dritthöchste WUE aller Arten und Sorten im Juli beziehungsweise die höchste der drei Arten und Sorten aus dem trockeneren Lebensraum aufgrund hohen Wachstums ( $1,74 \text{ cm}^2$ ) und relativ hohen Wasserverbrauchs ( $69,61 \text{ l}$ ). Er zeigte aber einen deutlichen Abfall der Effizienz im weiteren Verlauf des Sommers verursacht durch einen hohen (August:  $62,88 \text{ l}$ ) bis sehr hohen (September:  $23,04 \text{ l}$ ) Wasserverbrauch bei nur hohem (August:  $1,14 \text{ cm}^2$ ) bis moderatem (September:  $0,25 \text{ cm}^2$ ) Wachstum.

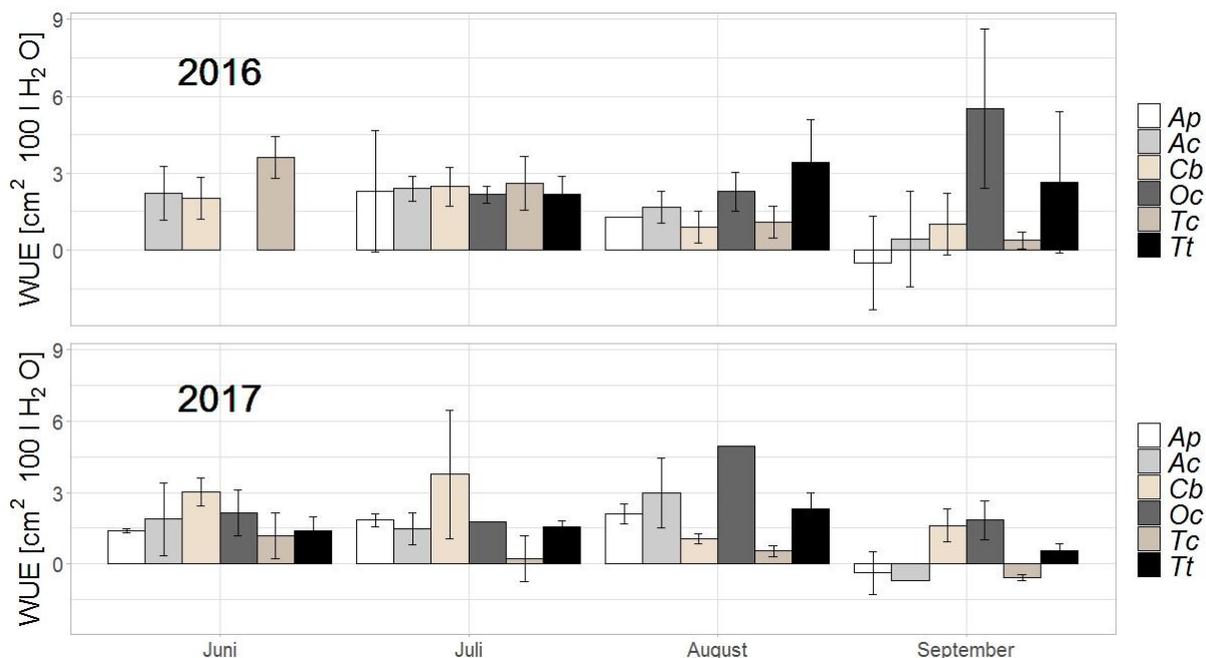


Abbildung 28. Wassernutzungseffizienz in den Sommermonaten 2016 und 2017 (Juni 2016: nur Quartier A). Die Wassernutzungseffizienz (WUE) versteht sich hier als das Verhältnis von auf Stammbasis fixiertem Kohlenstoff, repräsentiert durch die Zu- beziehungsweise Abnahme der Stammquerschnittsfläche ( $\text{cm}^2$ ), zu verbrauchten  $100 \text{ l}$  Wasser. Die Grafik zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der einzelnen Arten und Sorten. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1. Um die Datensätze für Juni 2016 und den Sommer 2017 erweitert und verändert nach Stratópoulos et al., 2018.

Auch im trockeneren Jahr 2017 (Kap. 4.1.1) zeigte die Hopfenbuche – dieses Mal gemittelt auf die Monate Juni bis September – mit  $2,08 \pm 1,51 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$  die höchste WUE. Die Säulen-Hainbuche, welche im Vorjahr die zweitniedrigste WUE aufgewiesen hatte, hatte 2017 eine deutlich höhere WUE mit einem Durchschnittswert von  $1,71 \pm 1,3 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ . Sie erreichte die höchste WUE aller Arten und Sorten innerhalb der ersten Hälfte des Sommers (Juni, Juli), wohingegen die Hopfenbuche im August und September die höchsten Werte aufwies. Ebenfalls wie im Jahr 2017 hatte der Feld-Ahorn die dritthöchste WUE mit insgesamt  $1,46 \pm 1,13 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ , gefolgt von der Brabanter Silber-Linde ( $0,95 \pm 0,72 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ) und dem Spitz-Ahorn ( $0,83 \pm 0,88 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ). Auf den gesamten Sommer gerechnet wies die Amerikanische Stadt-Linde erneut, dieses Mal jedoch mit großem Abstand, die geringste WUE ( $0,46 \pm 0,58 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ) auf.

Die hohe WUE der Säulen-Hainbuche im Juni und Juli ergab sich daraus, dass sie das höchste Wachstum aller Arten und Sorten aufwies (Juni:  $2,01 \text{ cm}^2$ ; Juli:  $2,26 \text{ cm}^2$ ), gekoppelt mit einem moderaten Wasserverbrauch (Juni:  $72,56 \text{ l}$ ; Juli:  $62,46 \text{ l}$ ). Da sie – weiterhin bei moderatem Wasserverbrauch – im August nach der Amerikanischen Stadt-Linde das zweitniedrigste Wachstum ( $0,90 \text{ cm}^2$ ) aufwies, fiel ihre WUE in diesem Monat dann deutlich ab ( $1,05 \pm 0,22 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ), erreichte im September aber erneut einen hohen Wert ( $1,62 \pm 0,7 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ) aufgrund von moderatem Wachstums ( $0,21 \text{ cm}^2$ ) bei relativ niedrigem Wasserverbrauch ( $38,53 \text{ l}$ ).

Die Hopfenbuche wies in der ersten Sommerhälfte sowohl relativ niedriges Wachstum (Juni:  $1,05 \text{ cm}^2$ ; Juli:  $0,99 \text{ cm}^2$ ) als auch einen relativ niedrigen Wasserverbrauch (Juni:  $49,22 \text{ l}$ , Juli:  $54,67 \text{ l}$ ) auf, was insgesamt zu der zeithöchsten WUE im Juni und der dritthöchsten WUE im Juli geführt hat. Aufgrund des niedrigsten Wasserverbrauches aller Arten und Sorten ( $59,76 \text{ l}$ ) bei gleichzeitig moderatem Wachstum ( $2,54 \text{ cm}^2$ ) im August beziehungsweise einem sehr starken Wachstum ( $0,83 \text{ cm}^2$ ) bei gleichzeitig moderatem Wasserverbrauch ( $38,63 \text{ l}$ ) im September, erreichte sie in diesen zwei Monaten die höchste WUE (August:  $4,97 \pm \text{NA} \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ; September:  $1,84 \pm 0,83 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ).

Der Feld-Ahorn zeigte eine deutliche Variation der WUE innerhalb des Sommers. Im Juni wurde aufgrund von hohem Wachstum ( $1,49 \text{ cm}^2$ ) bei sehr hohem Wasserverbrauch

(81,7 l) eine relativ hohe WUE ( $1,88 \pm 1,54 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ) verzeichnet. Dies war nicht mehr der Fall im Juli, wo das Wachstum nur sehr schwach war ( $1,06 \text{ cm}^2$ ) und der Wasserverbrauch mit 73,4 l moderat. Im August erreichte er wiederum nach der Hopfenbuche die zweithöchste WUE ( $2,99 \pm 1,48 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ), da er hier sowohl einen relativ moderaten Wasserverbrauch (72,2 l) als auch ein moderates Wachstum ( $2,18 \text{ cm}^2$ ) aufwies. Einen Monat später – im September – hingegen war die WUE die niedrigste aller sechs Arten und Sorten ( $-0,73 \pm 2,42 \text{ cm}^2 \text{ 100 l H}_2\text{O}^{-1}$ ), denn im Mittel zeigten die Individuen ein Schrumpfen der Stammquerschnittsflächen von  $-0,43 \text{ cm}^2$  im Vergleich zum Vorjahr.

Der Spitz-Ahorn erreichte im Durchschnitt weniger gute Werte der WUE als der Feld-Ahorn, da er in den Monaten Juli bis September jeweils nach der Brabanter Silber-Linde den höchsten Wasserverbrauch aufwies (Juli: 75,3 l, August: 120 l; September: 73,1 l). Sein Wachstum war im August mit  $2,58 \text{ cm}^2$  sogar das höchste aller Arten und Sorten, wohingegen im September eine Stammschrumpfung verzeichnet wurde ( $-0,05 \text{ cm}^2$ ).

Wie bereits im Vorjahr zeigte die Brabanter Silber-Linde eine höhere WUE später als früher im Sommer. Ihre Wuchsleistung war stets hoch im Vergleich mit den anderen Arten und Sorten (Juni:  $1,11 \text{ cm}^2$ ; Juli:  $2,25 \text{ cm}^2$ ; August:  $2,5 \text{ cm}^2$ ; September:  $0,66 \text{ cm}^2$ ), überproportional hoch war jedoch ihr Wasserverbrauch. Im Juli verbrauchte sie 145 l und somit 69,7 l mehr als der Spitz-Ahorn, welcher in diesem Monat den zweithöchsten Wasserverbrauch aufwies. Dies war auch der höchst gemessene Wert des monatlichen Wasserverbrauches in den zwei Versuchsjahren. Der Juni war der einzige Monat, in dem eine andere Art, nämlich der Feld-Ahorn, etwas mehr Wasser verbrauchte (Brabanter Silber-Linde: 80,3 l; Feld-Ahorn: 81,7 l). Im August und September lagen Wachstum und Wasserverbrauch auf einem hohen, jedoch weniger extrem ausgeprägten Niveau, was zu einer Verbesserung der WUE führte. Die Brabanter Silber-Linde gehörte auch zu den Arten und Sorten, welche im September noch keine Wuchsdepressionen aufzeigten.

Die Amerikanische Stadt-Linde konnte anders als im Vorjahr keine hohe WUE im Frühsommer erreichen. Bis auf den September hatte sie über den Sommer die niedrigste WUE. Dies lag daran, dass sie ein sehr schwaches Wachstum aufwies (Juni:  $0,72 \text{ cm}^2$ ; Juli:  $0,1 \text{ cm}^2$ ; August:  $0,34 \text{ cm}^2$ ; September:  $-0,12 \text{ cm}^2$ ) bei gleichzeitig niedrigem Wasserverbrauch (Juni: 68,3 l; Juli: 54,6 l; August: 63,5 l; September: 27,3 l).

---

### *Zwischenfazit:*

Arten und Sorten aus Lebensbereich (LB) 6 wiesen eine höhere Wassernutzungseffizienz auf als Arten und Sorten aus LB 3. Diese resultierte jedoch nicht notwendigerweise aus einem niedrigen Wasserverbrauch, sondern war das **Produkt von unterschiedlichen Kombinationen aus Transpirations- und Wachstumsmustern.**

---

## **4.8 Wurzelbiomasse und Wurzel-Spross-Verhältnis**

Art beziehungsweise Sorte und die Bodenaustrocknung durch die Regenausschlusskonstruktionen hatten jeweils einen signifikanten Effekt auf das Trockengewicht von Zweigen, Stamm und Wurzeln (Tabelle 9). Grundsätzlich wurde das höchste Trockengewicht bei den Baumstämmen gemessen gefolgt von den Wurzelsystemen. Die Zweige hatten das niedrigste Trockengewicht.

Im Falle der Biomasse der Zweige, erreichten Spitz- und Feld-Ahorn in der Kontrolle die höchsten Mittelwerte (Abb. 29, Tabelle 9) ( $1.174 \pm 26$  g und  $1.121 \pm 178$  g), Säulen-Hainbuche und Amerikanische Stadt-Linde in der Trockenvariante hingegen die niedrigsten ( $365 \pm 60$  g und  $309 \pm 49$  g). Art beziehungsweise Sorte und die Bodenaustrocknung hatten beide einen sehr starken Einfluss ( $p < 0,001$ ) auf die Höhe des Trockengewichtes der Zweig-Biomasse der Bäume.

Beim Trockengewicht der Baumstämme zeigten die Kontrollgruppen der Ahorne ebenfalls die höchsten Werte (Spitz-Ahorn:  $7.512 \pm 765$  g; Feld-Ahorn:  $6.162 \pm 1.205$  g), und die niedrigsten wurden registriert bei der Amerikanischen Stadt-Linde in beiden Behandlungsvarianten (Kontrolle:  $4.089 \pm 220$  g; trocken:  $3.407 \pm 322$  g). Feld-Ahorn und Säulen-Hainbuche zeigten die höchste Resistenz ( $R_{TK} = 0,92$  und  $0,96$ ), während Spitz-Ahorn und Amerikanische Stadt-Linde mehr Biomasseproduktion durch die Bodenaustrocknung einbüßten ( $R_{TK} = 0,8$  und  $0,83$ ). Der Effekt der Behandlung war hier etwas schwächer ausgeprägt als bei den Zweigen ( $p = 0,008$ ).

Tabelle 9. Deskriptive Statistik zu Trockengewicht und Wurzel-Spross-Verhältnis von vier Arten und Sorten in den beiden Behandlungsvarianten (Kontrolle und trocken). Enthalten ist auch die Resistenz im Verhältnis zu den Kontrollpflanzen sowie die Ergebnisse der zweifaktoriellen Mittelwertvergleiche mit Art/Sorte und Bodenaustrocknung als feste Effekte. Um *Acer platanoides* erweitert und verändert nach Stratópoulos et al., 2019a.

	Gruppe	n	M	± SD	Min	Median	Max	R <sub>TK</sub>	p Austrocknung p Art/Sorte	
<b>Trockengewicht [g]</b>										
Zweige	<i>Ap</i>	K	2	1.174	26	1.156	1.174	1.192	0,88	p < 0,001*** p < 0,001***
		t	3	1.038	372	625	1.141	1.347		
	<i>Ac</i>	K	3	1.121	178	920	1.189	1.255	0,70	
		t	3	785	90	696	784	875		
	<i>Cb</i>	K	4	593	9	588	590	606	0,61	
		t	3	365	60	309	358	429		
	<i>Tc</i>	K	4	446	31	415	442	485	0,69	
		t	4	309	49	243	317	358		
Stamm	<i>Ap</i>	K	3	7.512	765	6.661	7.734	8.142	0,80	p = 0,008** p < 0,001***
		T	2	5.986	299	5.774	5.987	6.197		
	<i>Ac</i>	K	3	6.162	1.205	5.015	6.055	7.417	0,92	
		t	2	5.653	128	5.562	5.653	5.743		
	<i>Cb</i>	K	4	5.227	316	4.862	5.277	5.492	0,96	
		t	3	5.008	390	4.592	5.066	5.365		
	<i>Tc</i>	K	4	4.089	220	3.817	4.102	4.336	0,83	
		t	4	3.407	322	2.962	3.480	3.707		
Wurzeln	<i>Ap</i>	K	3	3.276	221	3.131	3.167	3.530	0,93	p < 0,001*** p < 0,001***
		t	2	3.046	821	2.465	3.046	3.626		
	<i>Ac</i>	K	3	5.280	468	4.938	5.089	5.813	0,73	
		t	3	3.830	187	3.628	3.866	3.996		
	<i>Cb</i>	K	4	2.440	220	2.193	2.422	2.725	0,55	
		t	3	1.339	89	1.271	1.305	1.440		
	<i>Tc</i>	K	4	1.869	64	1.807	1.863	1.943	0,69	
		t	4	1.292	26	1.266	1.290	1.321		
<b>Wurzel-Spross-Verhältnis [g g<sup>-1</sup> Trockengewicht]</b>										
	<i>Ap</i>	K	3	0,40	0,02	0,38	0,40	0,41	1,10	p = 0,008** p < 0,001***
		t	2	0,44	0,08	0,39	0,44	0,49		
	<i>Ac</i>	K	3	0,73	0,08	0,68	0,70	0,82	0,81	
		t	3	0,59	0,02	0,58	0,59	0,60		
	<i>Cb</i>	K	4	0,42	0,02	0,40	0,41	0,45	0,60	
		t	3	0,25	0,01	0,24	0,25	0,26		
	<i>Tc</i>	K	4	0,41	0,03	0,39	0,40	0,45	0,85	
		t	4	0,35	0,03	0,33	0,34	0,39		

Abkürzungen: K = Kontrolle, t = Trockenvariante, n = Stichprobenzahl, M = Mittelwert, ± SD = Standardabweichung, Min = Minimum, Max = Maximum, R<sub>TK</sub> = Resistenz, p = p-Wert als Ergebnis der Mittelwertvergleiche. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

Die p-Werte sind gegeben für ein Signifikanzniveau von 0,05. <sup>N.s.</sup> bedeutet nicht signifikant, \* statistisch signifikant (p < 0,05), \*\* sehr signifikant (p < 0,01) und \*\*\* hochsignifikant (p < 0,001).

Im Falle der Wurzeln wies der Feld-Ahorn sowohl in der Kontroll- als auch in der Trockenvariante mehr Trockengewicht auf als alle anderen Gruppen (Kontrolle:  $5.280 \pm 468$  g; trocken:  $3.830 \pm 187$  g), obwohl die Bodenaustrocknung einen hohen Rückgang der Wurzelbiomasse verursachte. Wie bereits bei der Zweig-Biomasse beobachtet, hatten Säulen-Hainbuche und Amerikanische Stadt-Linde in der Trockenvariante die niedrigsten Werte ( $1.339 \pm 89$  g und  $1.292 \pm 26$  g). Erwartungsgemäß war aufgrund der Staunässe beim Spitz-Ahorn kein signifikanter Austrocknungseffekt messbar. Bei einem Einzelbaum der Trockenvariante, welcher am meisten durch die Staunässe beeinträchtigt war (Kap. 4.1.2), wurde ein sehr niedriges Wurzelgewicht gemessen (Individuum Ap 3: 2.465 g). In diesem Fall könnten zu geringe Sauerstoffmengen im Boden zu Wuchsdepressionen und einem Absterben von Wurzelteilen geführt haben.

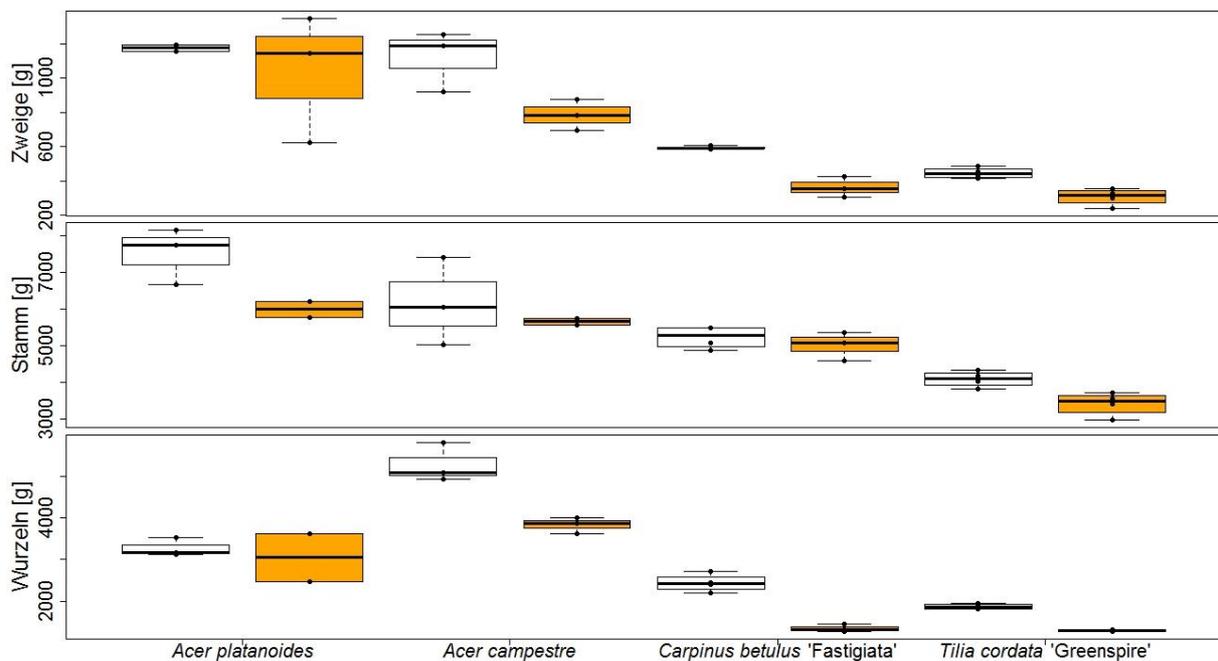


Abbildung 29. Vergleich des Trockengewichts der Kompartimente Zweige, Stamm und Wurzeln von vier Arten und Sorten in den Behandlungsvarianten Kontrolle (weiß) und trocken (orange). Um *Acer platanoides* erweitert und verändert nach Stratópoulos et al., 2019a.

Beim Wurzel-Spross-Verhältnis wurde insgesamt ein starker Austrocknungseffekt sichtbar ( $p = 0,008$ ). Nur der Spitz-Ahorn hatte in der Trockenvariante im Mittel höhere Werte ( $0,44 \pm 0,08$  g g<sup>-1</sup>) als in der Kontrolle ( $0,4 \pm 0,02$  g g<sup>-1</sup>), was durch die hohen

Bodenfeuchtwerte zu erklären war. Der Feld-Ahorn hatte in beiden Varianten das höchste Wurzel-Spross-Verhältnis (Kontrolle:  $0,73 \pm 0,08 \text{ g g}^{-1}$ ; trocken:  $0,59 \pm 0,02 \text{ g g}^{-1}$ ), Säulen-Hainbuche und Amerikanische Stadt-Linde in der Trockenvariante zeigten hingegen erneut die niedrigsten Mittelwerte ( $0,25 \pm 0,01 \text{ g g}^{-1}$  und  $0,35 \pm 0,03 \text{ g g}^{-1}$ ).

Im Hinblick auf Dimensionen der unterirdischen Biomasse (Tabelle 10) hatte der Spitz-Ahorn die geringste Durchwurzelungstiefe in beiden Behandlungsvarianten (Kontrolle:  $25,00 \pm 5,00 \text{ cm}$ ; trocken:  $28,67 \pm 4,99 \text{ cm}$ ), zeigte aber die größte horizontale Ausdehnung (Kontrolle:  $33,13 \pm 1,13 \text{ cm}$ ; trocken:  $34,33 \pm 0,62 \text{ cm}$ ) und das dichteste Wurzelwerk in der Kontrollvariante ( $0,22 \pm 0,05 \%$ ) beziehungsweise nach dem Feld-Ahorn das zweit-dichteste Wurzelwerk in der Trockenvariante (Feld-Ahorn:  $0,31 \pm 0,02 \%$ , Spitz-Ahorn:  $0,30 \pm 0,05 \%$ ). Feld-Ahorn und Säulen-Hainbuche wurzelten in beiden Behandlungsvarianten am tiefsten und zeigten eine mittlere Breite der Wurzelsysteme. Das Wurzelsystem der Säulen-Hainbuche war jedoch weniger dicht im Vergleich zum Feld-Ahorn, insbesondere in der Kontrollvariante, in der die Säulen-Hainbuche mit  $0,33 \pm 0,05 \%$  die höchste Porosität aller Arten und Sorten aufwies. In der Trockenvariante wies der Feld-Ahorn sogar das dichteste Wurzelwerk aller vier Arten und Sorten auf. Die Amerikanische Stadt-Linde zeigte mittlere Durchwurzelungstiefen in beiden Behandlungsvarianten (Kontrolle:  $28,50 \pm 1,50 \text{ cm}$ ; trocken:  $29,00 \pm 1,41 \text{ cm}$ ), aber die niedrigste Breite der Wurzelsysteme (Kontrolle:  $30,75 \pm 1,75 \text{ cm}$ ; trocken:  $28,67 \pm 2,77 \text{ cm}$ ). Bei ihr hatte die Bodenaustrocknung den höchsten Effekt auf die Dichte der Wurzelsysteme (Kontrolle:  $0,24 \pm 0,01 \%$ , trocken:  $0,38 \pm 0,04 \%$ ). Diesbezüglich waren beim Feld-Ahorn kein Effekt (Kontrolle:  $0,30 \pm 0,03 \%$ , trocken:  $0,30 \pm 0,05$ ) und bei der Säulen-Hainbuche nur ein geringer Effekt feststellbar (Kontrolle:  $0,33 \pm 0,05 \%$ , trocken:  $0,34 \pm 0,03 \%$ ). Insgesamt führte die Bodenaustrocknung zu Wurzelwerken mit signifikant geringerer Dichte ( $p = 0,0349$ ); die Unterschiede zwischen den vier Arten und Sorten waren hingegen nicht signifikant ( $p = 0,1868$ ).

Tabelle 10. Dimensionen der ausgehobenen Wurzelbiomasse von vier Arten und Sorten in den zwei Varianten (Kontrolle und trocken). Die Dichte der Wurzelwerke wird ausgedrückt in % Porosität. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tab. 1. Um *Ap* erweitert und verändert nach Stratópoulos et al., 2019a.

Art/ Sorte	Wurzeltiefe [cm ± SD]		Wurzelbreite [cm ± SD]		Wurzelvolumen [m <sup>3</sup> ± SD]		Porosität des Wurzelsystems [% ± SD]	
	Kontrolle	trocken	Kontrolle	trocken	Kontrolle	trocken	Kontrolle	trocken
<i>Ap</i>	25,00 ± 5,00	28,67 ± 4,99	33,13 ± 1,13	34,33 ± 0,62	0,056 ± 0,012	0,060 ± 0,003	0,22 ± 0,05	0,31 ± 0,02
<i>Ac</i>	30,33 ± 7,85	29,67 ± 0,47	31,00 ± 2,75	29,92 ± 2,00	0,050 ± 0,019	0,056 ± 0,008	0,30 ± 0,03	0,30 ± 0,05
<i>Cb</i>	30,00 ± 0,00	30,00 ± 0,00	32,25 ± 0,98	29,00 ± 2,01	0,057 ± 0,005	0,036 ± 0,007	0,33 ± 0,05	0,34 ± 0,03
<i>Tc</i>	28,50 ± 1,50	29,00 ± 1,41	30,75 ± 1,75	28,67 ± 2,77	0,058 ± 0,000	0,047 ± 0,009	0,24 ± 0,01	0,38 ± 0,04

### Zwischenfazit:

- Die Trockenheitsverträglichkeit von Arten und Sorten steht im Zusammenhang mit ihrer **Kohlenstoffpartitionierung**.
  - Der Feldahorn als Vertreter trockenheitsadaptierter Gehölze weist ein starkes Wurzelwerk bei gleichzeitig lichter Belaubung auf. Somit steht eine geringe **verbrauchende Blattmasse** einer hohen **versorgenden Wurzelbiomasse** gegenüber.
- ➡ Bei der Entwicklung von Vegetationstragschichten in Baumgruben und -gräben ist für die unterirdische Wurzelbiomasse ausreichend Raum einzuplanen.
- ➡ Ein **hohes Wurzel-Spross-Verhältnis** ist bedeutsam im Sinne der Trockenheitstoleranz, limitiert jedoch gleichzeitig die Kühlleistung. Dieser *trade-off* scheint bei reinen Arten zugunsten einer höheren Widerstandsfähigkeit in Kauf genommen werden zu müssen. Welche Potenziale Sorten mit **artfremden Wurzelunterlagen** bergen, ist eine wichtige Frage künftiger Forschung.

## 5 Diskussion

Im Rahmen dieser Dissertation konnte bestätigt werden, dass sich die höhere Trockenheitstoleranz von Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern zu Lasten ihres Kühlpotenzials auswirkt. Zwischen den Bemühungen zur Pflanzung trockenheitstoleranter Bäume einerseits und der möglichst effektiven Nutzung ihrer Regulationsleistungen andererseits gibt es somit einen Zielkonflikt (engl. *trade-off*). Die Gültigkeit dieses *trade-offs* beschränkt sich allerdings auf Wuchssituationen ausreichender Bodenwasserverfügbarkeit und mit kurzen Phasen atmosphärischer Trockenheit. Bei langanhaltender, starker Trockenheit wurden jedoch die zu einer höheren Trockenheitstoleranz befähigenden Eigenschaften zu einer Grundvoraussetzung für die Gewährleistung eines konstanten, wenn auch niedrigen Kühlpotenzials. In dieser spezifischen Wuchssituation konnten Arten und Sorten mit Anpassungen an Trockenheit (z.B. hohes Wurzel-Spross-Verhältnis) sogar teilweise ein höheres Kühlpotenzial erreichen. Das lag daran, dass sie weniger Einbrüche beim Wasserverbrauch und keinen frühzeitigen Blattfall zeigten. Allerdings haben die Ergebnisse auch gezeigt, dass die morphologischen und physiologischen Anpassungen an Trockenheit und die Reaktionsmuster innerhalb der Gruppe der Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern sehr unterschiedlich ausfallen können. Im Zuge dessen kam auch die Frage auf, ob gezüchtete Sorten die Anpassungen an Trockenheit in gleichem Maße wie die reinen Arten mit sich führen oder hier eine Gruppe von potenziellen künftigen Straßenbäumen gesondert beachtet werden muss, bei der eine Einteilung nach Lebensbereichen nicht uneingeschränkt Sinn macht. Anlass dazu gaben die Beobachtungen bei der Brabanter Silber-Linde, welche auf einer artfremden Wurzelunterlage der heimischen Sommer-Linde veredelt war, und sowohl ein hohes Kühlpotenzial als auch eine hohe Trockenheitstoleranz aufwies. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert und im Anschluss daran ein Ausblick mit Empfehlungen für weitere Forschung gegeben (Kap. 6).

## 5.1 Art- und sortenspezifische Physiologie im Jahresverlauf

Aufgrund der weitgehend homogenen Wuchsbedingungen in der Baumschule konnte davon ausgegangen werden, dass Unterschiede hinsichtlich der gemessenen Parameter nicht aufgrund von räumlicher oder klimatischer Variabilität herrührten. Welche Rolle die Zugehörigkeit einer Art/Sorte zum jeweiligen Lebensbereich (Kiermeier, 1992) und die Sortenthematik für die unterschiedlichen Wertausprägungen spielte und welche Erkenntnisse über einzelne Arten und Sorten seitens weiterer Studien vorliegen, soll im Folgenden diskutiert werden.

Bei Analyse der Eintrittszeitpunkte des Knospenschwellens zeigten nahe verwandte Arten beziehungsweise Sorten die größten Übereinstimmungen. Im weiteren Verlauf der Vegetationsperioden reagierten sie jedoch deutlich unterschiedlich. Bei den Linden zeigten sich vor allem beim Blattfall große Unterschiede bezüglich der Eintrittszeitpunkte. Im Herbst 2016 waren die Unterschiede sogar größer als zwischen jeglichen anderen möglichen Vergleichskombinationen der sechs Arten und Sorten.

Darüber hinaus gab es interannuell sehr große Unterschiede hinsichtlich der phänologischen Eintrittszeitpunkte bei einer Art beziehungsweise Sorte. So war es beispielsweise bei der Amerikanischen Stadt-Linde, die 2016 gemeinsam mit der Brabanter Silber-Linde am spätesten, 2017 jedoch am frühesten ihre Blätter entfaltet hatte (Kap. 4.3). Starke Regelmäßigkeit wies sie jedoch innerhalb der zwei Versuchsjahre beim Wachstum auf, das jeweils im Mai ein Maximum erreichte, gefolgt von einer Phase sehr schwachen Wachstums in Richtung Herbst (Kap. 4.5). Maximalwerte der Xylemflussdichte ( $J_s$ ) wurden ebenfalls im Mai 2017 gemessen (Kap. 4.4.1). Auch bei der Brabanter Silber-Linde war ein ausgeprägtes Maximum von  $J_s$  früh im Sommer erkennbar gefolgt von einem graduellen Abfall in Richtung Herbst (Abb. 22). Beide Sorten zeigten somit den höchsten Wasserverbrauch vor dem Eintritt der Blüte im Hochsommer, während beispielsweise die Ahorne früh im Jahr blühten und eher in Richtung Spätsommer Wuchs- und Wasserverbrauchs-Maxima aufwiesen. Maximalwerte von  $J_s$  im späten Mai/frühen Juni und eine deutliche Abnahme der  $J_s$ -Werte im weiteren Verlauf des Sommers wurden auch bei älteren Amerikanischen Linden (*Tilia americana*) in einem Stadtquartier in Minneapolis-Saint Paul, Minnesota

gemessen (Peters et al., 2010). Auch Rahman et al. (2019) zeigten bei ihrem Vergleich von  $J_s$ -Werten der ringporigen Robinie (*Robinia pseudoacacia*) und der zerstreutporigen Winter-Linde im Münchener Osten bei letzterer einen deutlichen Abfall der  $J_s$ -Werte nach hohen Werten zwischen Ende Juni und Ende Juli, wohingegen die Robinie bis Anfang Oktober einen sehr einheitlichen Wasserverbrauch zeigte. Die in beiden Studien gemessenen Bäume waren deutlich größer als die Jungbäume in der Baumschule und die klimatischen Bedingungen naturgemäß verschieden, wodurch Unterschiede bei den Eintrittszeitpunkten erklärt werden können. Außerdem wurde bei beiden Studien nicht näher darauf eingegangen, ob die gemessenen Bäume reine Arten oder Sorten waren, obwohl zumindest in der Münchner Studie eine Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Amerikanische Stadt-Linde gemessen wurde anstelle der reinen Art (Kap. 3.3). Es scheint sich dennoch abzuzeichnen, dass bei Linden im Verlauf der Vegetationsperiode mit einem kontinuierlichen Rückgang der  $J_s$ -Werte – und somit auch der Kühlleistung durch Transpiration – gerechnet werden kann, nachdem zwischen dem späten Frühjahr und dem Hochsommer Höchstwerte erreicht wurden.

Die Säulen-Hainbuche wies ebenfalls früh im Sommer ihren maximalen Wasserverbrauch auf mit abfallenden Werten in Richtung Herbst. Später im Sommer wurden Maximalwerte des Wasserverbrauchs und des Wachstums bei den Ahornen gemessen. Sie erreichten jeweils ihre mittleren Wuchsmaxima 2016 im Juli und 2017 im August. Der Spitz-Ahorn zeigte außerdem im August ein ausgeprägtes Maximum von  $J_s$ . Bei dem Versuch von Bush et al. (2008) an bewässerten Stadtbäumen in Salt Lake City, Utah wies der Spitz-Ahorn gemeinsam mit der ebenfalls zerstreutporigen Platane (*Platanus acerifolia*) das Maximum von  $J_s$  im Übergang von Juni zu Juli auf, gefolgt von kontinuierlich abnehmenden Werten in Richtung Herbst. Nach Meinung der Autoren führte das Fehlen einer empfindlichen stomatären Regulation bei den zerstreutporigen Baumarten im Versuch zu Embolienbildung im Spätsommer und damit verbundenen geringeren  $J_s$ -Werten und sinkender hydraulischer Leitfähigkeit. Die Annahme geringer stomatärer Regulation beim Spitz-Ahorn deckt sich mit der Beobachtung eines kaum regulierten Wasserverbrauches bei hohen Sättigungsdefiziten der Luft in der ersten Sommerhälfte in diesem Versuch (Kap. 4.1.1). Andererseits wurden in den Wurzelzonen des Spitz-Ahorns ganzjährig überdurchschnittlich hohe Bodenfeuchtwerte gemessen

(Kap. 4.1.2), weshalb der Rückgang des Wasserverbrauches nicht durch Embolienbildung erklärt werden kann. Vielmehr scheint es sich um einen artspezifischen Jahresgang des Ressourcenverbrauches und des Wachstums mit Maximalwerten im August unter den hier herrschenden klimatischen Bedingungen zu handeln.

Bei der Hopfenbuche aus dem trockeneren Lebensbereich gab es wiederum eine höhere interannuelle Variabilität was das Wachstum betrifft: sie erreichte 2016 ihr Wuchsmaximum relativ früh im Jahr, 2017 hingegen erst im August, wie die Ahorne. Auch die Zeitpunkte der Blattentfaltung waren sehr uneinheitlich über die zwei Versuchsjahre. Genau konträr zur Amerikanischen Stadt-Linde hatte sie ihre Blätter 2016 am frühesten von allen sechs Arten und Sorten entfaltet, im Jahr 2017 hingegen gemeinsam mit der Brabanter Silber-Linde am spätesten (Kap. 4.3). Abgesehen davon wies sie in beiden Jahren die längste Vegetationsperiode auf.

Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern – allen voran die Hopfenbuche – akkumulierten im Mittel weniger Wärmesummen bis zum Beginn des Knospenaustriebes als Bäume aus artenreichen Wäldern und Gehölzgruppen. Ein im Vergleich zur Amerikanischen Stadt-Linde deutlich geringerer Anspruch an einen winterlichen Kältereiz (engl. *chilling requirement*) könnte der Grund dafür sein, dass sowohl das Knospenschwellen als auch der Knospenaufbruch von Brabanter Silber-Linde und Hopfenbuche in beiden Versuchsjahren relativ früh erfolgte. Wiederum führte bei ihnen möglicherweise der starke Kälterückfall im April 2017 zu dem verzögerten Abschluss der Blattentfaltung.

Auch Polgar et al. (2014) argumentierten, dass Arten aus südlicheren Regionen aufgrund ihres niedrigeren Anspruches an den winterlichen Kältereiz früher im Jahr den Blattaustrieb vollziehen könnten. Das Gegenteilige kam bei einer Untersuchung an fast 500 Gehölzen im Botanischen Garten in München (Zohner & Renner, 2014) heraus. Hier trieben in einem von zwei Versuchsjahren Arten aus südlicheren Erdregionen signifikant später aus als heimische Arten. Laut den Autoren benötigten Bäume aus wärmeren Erdregionen für ihre Blattentfaltung höhere Wärmesummen als Bäume aus einem gemäßigteren Klima. Arten beziehungsweise Sorten, wie die Hopfenbuche und die

Brabanter Silber-Linde, welche zwar in Mitteleuropa akklimatisiert, jedoch evolutionär an wärmere und trockenere Bedingungen angepasst sind, würden demzufolge ihre Blätter auch eher gemäß den klimatischen Signalen (*chilling*, Frühjahrstemperaturen, Photoperiode) des Herkunftsgebietes entwickeln. In der Gegenüberstellung zwischen Pionierbaumarten/Exoten und Arten späterer Sukzessionsstadien konnten Basler & Körner (2014) eine hohe Sensitivität gegenüber der Tageslänge (Photoperiode) bei der Winter-Linde und anderen Arten späterer Sukzessionsstadien feststellen, wohingegen die Arten früher Sukzessionsstadien hier keine signifikante Sensitivität aufwiesen. Dieser Mechanismus bewahrt Bäume vor Spätfrostschäden an bereits entfalteten Trieben. Anders als die Winter-Linde weist die Hainbuche laut Zohner & Renner (2014) weder eine hohe Sensitivität gegenüber der Tageslänge noch einen Bedarf für langes *chilling* auf. Hingegen zeigte in ihrer Metaanalyse von 1886-2014 diese Baumart eine hohe Sensitivität gegenüber der vorherrschenden Temperatur. Pro 1 °C Temperaturerhöhung im Frühjahr erfolgte die Blattentfaltung sieben Tage früher.

Eine genetische Variation hinsichtlich der phänologischen Eintrittszeitpunkte ist auch aus der Provenienzforschung bekannt und bezieht sich diesem Fall auf eine innerartliche Variabilität. In einem Baumschulexperiment in Ohio wurde beobachtet, dass Populationen, welche aus nördlicheren Regionen stammten, früher austrieben als südlichere Herkünfte (Kriebel, 1957). Temperaturbedingte Unterschiede gibt es ferner zwischen Populationen aus höheren Lagen im Vergleich zu Populationen aus niedrigeren Lagen (Vitasse et al., 2009). Allerdings muss die Art des Zusammenhanges zwischen den im Ursprungsgebiet herrschenden Jahrestemperaturen und den phänologischen Eintrittsterminen nicht für alle Arten gleich gerichtet sein: Während bei dem kontrollierten Experiment von Vitasse et al. (2009) Buchen mit Herkunft aus hohen Lagen früher austrieben als Buchen aus niedrigeren Lagen, wurde bei Eichen und Eschen das gegenteilige beobachtet.

Die zugrunde liegenden Ursachen für phänologische Eintrittstermine unterschiedlicher Baumarten sind nach wie vor nicht hinreichend geklärt. Während die phänologischen Entwicklungen entlang von Nord-Süd- oder Höhengradienten in der freien Landschaft vielfach untersucht wurden (siehe z.B. Schuster et al., 2014), fehlen Studien, die die

Rolle der Herkunft einer Baumart für ihre phänologische Strategie unter vergleichbaren Bedingungen analysieren. Das Vorhandensein von nicht-heimischen Arten, welche erst seit erdgeschichtlich kurzer Zeit in Mitteleuropa angepflanzt werden, insbesondere aber auch die Integration von Sorten in der Untersuchung erschwert die Anwendung historischer, phylogenetischer oder adaptiver Erklärungsansätze (Lechowicz, 1984). In Zukunft wären langjährige Vergleichsstudien in Baumschulen oder Botanischen Gärten wünschenswert, die sowohl die Rolle der klimatischen Bedingungen im ursprünglichen Lebensbereich, die je nach Baumart unterschiedliche Bedeutung externer klimatischer Signale (Basler & Körner, 2014; Zohner & Renner, 2014) als auch die Unterschiede zwischen reinen Arten und Sorten untersuchen.

## **5.2 Art- und sortenspezifische Reaktionen auf Trockenheit**

### 5.2.1 Atmosphärische Trockenheit: Stomatäre Sensitivität

In den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Xylemflussdichte ( $J_s$ ) eine hohe Abhängigkeit von dem Sättigungsdefizit der Luft (VPD) und der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) aufweist. Beim Auftragen der täglichen  $J_s$ -Werte gegen das VPD (Abb. 19) führte die Anwendung von exponentiellen Sättigungsfunktionen in den meisten Fällen zu einer Verbesserung der Modellgüte im Vergleich zu linearen Regressionsmodellen. Somit konnte gezeigt werden, dass der Wasserverbrauch der Versuchsbäume bei hoher atmosphärischer Trockenheit – mehr oder weniger stark (Kap. 4.4.2) – reguliert wird. Bei der Korrelation von  $J_s$  mit PAR zeigten diese Sättigungskurven zumeist auch die bessere Modellgüte, wobei die Amerikanische Stadt-Linde im Juni und September und die beiden Ahorne im August eine geringere Regulation der Wasserverluste aufwiesen und somit in diesen Einzelfällen lineare Modelle die Zusammenhänge besser beschreiben konnten (Tabelle 7).

Der starke Einfluss von atmosphärischen Triebkräften für den Wasserverbrauch von Bäumen wurde bereits in zahlreichen Studien beschrieben (Oren et al., 1998; Bush et al., 2008; Peters et al., 2010; Pataki et al., 2011; Gillner et al., 2015a). Oren et al. (1998) stellten fest, dass die Stomata auf einen Anstieg des VPD mit einem teilweisen Schließen reagieren und somit die stomatäre Leitfähigkeit in den meisten Fällen mit

steigendem VPD exponentiell abnimmt. Somit kommt es zu einem nichtlinearen Anstieg der Transpirationsrate bis zu einem Plateau beziehungsweise in einigen Fällen sogar zu einem Absinken des Wasserverbrauches bei hohem VPD, wie es auch in der hier vorliegenden Dissertation gezeigt werden konnte. Bei Xylemfluss-Messungen an kontinuierlich bewässerten Stadtbäumen in einem semi-ariden Klima in Utah, USA (Bush et al., 2008) wurde ein Sättigungseffekt bei hohem VPD nur bei ringporigen Baumarten festgestellt. Bei den Zerstreutporern (*Acer platanoides*, *Platanus acerifolia*, *Populus fremontii*) waren die Zusammenhänge zwischen  $J_s$  und dem VPD linear. Die Beobachtungen bezüglich des Zusammenhanges zwischen  $J_s$  und VPD entsprechen jedoch den Ergebnissen von Peters et al. (2010), die bei Messungen an Bäumen in vorstädtischen Siedlungen in Minnesota, USA herausfanden, dass der Zusammenhang zwischen  $J_s$  und dem auf die Tageslänge normalisierten Sättigungsdefizit der Luft ( $D_z$ ) am besten mit Hilfe exponentieller Sättigungsmodelle beschrieben werden kann. Ebenfalls stimmen – mit Ausnahme der Amerikanischen Stadt-Linde – die Beobachtungen überein, dass zerstreutporige Bäume umso mehr auf hohes VPD mit stomatärer Regulation reagieren je weiter der Verlauf der Vegetationsperiode fortgeschritten ist, und dass die stomatäre Regulation im Spätsommer früher, also bei niedrigerem VPD, initiiert wird als früher im Jahr. Beim Zusammenhang zwischen  $J_s$  und PAR ermittelten sie hingegen für die zerstreutporigen Baumarten *Tilia americana* und *Juglans nigra* gemeinsam mit den Koniferen der Gattungen *Picea* und *Pinus* durchgehend lineare Zusammenhänge, während Sättigungserscheinungen nur bei den Ringporern der Gattungen *Fraxinus* und *Ulmus* sichtbar wurden. Auch fanden sie keine Unterschiede bezüglich dieser Zusammenhänge im Jahresverlauf. Die höhere Anfälligkeit von Ringporern gegenüber Kavitationen im Xylem aufgrund ihrer größeren Leitbahnen im Frühholz (Tyree & Zimmermann, 2002, S. 21) wurden bereits in Kapitel 2.2.3 erörtert und erklären ihren stärker und konstanter regulierten Wasserverbrauch in den Studien von Bush et al. (2008), Peters et al. (2010) und Moser-Reischl et al. (2019). Die linearen Zusammenhänge für die Zerstreutporer und Koniferen bei Peters et al. (2010) sind insbesondere bemerkenswert, weil die maximalen PAR-Werte mit  $> 60 \text{ mol m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$  deutlich höher waren als die in der Baumschule gemessenen. Eine mögliche Erklärung für die Unterschiede zwischen dem Verhalten der Zerstreutporer in der vorliegenden Dissertation im Vergleich zu den Beobachtungen von Peters et al. (2010)

ist das unterschiedliche Alter der untersuchten Bäume. Die mittleren Durchmesser betragen bei Peters et al. zwischen 16,7 cm und 21,0 cm, während die Jungbäume im Baumschulversuch deutlich kleinere Durchmesser aufwiesen (Tabelle 2). Basierend auf dem Modell von Jarvis (1976) nutzten Dierick et al. (2010) die Parameter Strahlung und VPD um  $J_s$  von 17 tropischen Baumarten zu modellieren und erzielten gute Übereinstimmungen mit den tatsächlich gemessenen Werten. Für die isolierte Berechnung des Einflusses der Strahlung auf  $J_s$  in ihrem multiplikativen Modell verwendeten sie Hyperbelfunktionen, bei denen sich im Bereich hoher Strahlung die Kurve asymptotisch an den maximalen Wert von  $J_s$  annäherte. Somit wurde eine Lichtsättigung in das Modell integriert, wie sie auch in der hier vorliegenden Untersuchung größtenteils vorgefunden werden konnte.

### 5.2.2 Isohydrische und anisohydrische Wasserverbrauchsmuster

Die Kurvenverläufe von Bäumen aus dem trockeneren Lebensbereich wiesen in der Tendenz stärker abgeflachte Kurvenverläufe und somit eine stärker isohydrische stomatäre Regulation des Wasserstatus (Kap. 2.3.3) auf als Bäume aus dem frischeren Habitat. Das bedeutet auch, dass sie bereits bei niedrigeren VPD-Werten ihren maximalen Wasserverbrauch aufwiesen und dieser im Anschluss daran einer relativ starken Regulation unterlag. Auch Oren et al. (1998) stellten fest, dass es eine Proportionalität zwischen dem stomatären Verhalten bei niedrigem VPD und der stomatären Sensitivität einer Pflanze gibt: Arten, welche eine hohe stomatäre Leitfähigkeit bei niedrigem VPD aufweisen, benötigen eine umso höhere stomatäre Sensitivität beziehungsweise Regulation bei hohem VPD, um den Blattwasserstatus konstant zu halten.

Allerdings waren diese Reaktionsmuster auch innerhalb der Lebensbereich-Gruppen sehr uneinheitlich. Die Brabanter Silber-Linde zeigte beispielsweise ein ausgeprägtes Maximum von  $J_s$  im Juni und erst im September einen stärker regulierten Wasserverbrauch, und somit eine Mischung aus isohydrischem und anisohydrischem Verhalten, während die Hopfenbuche eine durchgehend starke Regulation aufwies, wodurch der Wasserverbrauch auf einem sehr einheitlichen Niveau über den gesamten Messzeitraum blieb (Kap. 4.4.1, 4.4.2). Ihr eindeutig isohydrisches Reaktionsmuster

unterschied sich auch am stärksten von ihrem Vergleichspartner, der Säulen-Hainbuche, welche wie die Brabanter Silber-Linde erst im September eine höhere Regulation der Wasserverluste zeigte (anisohydrisches Verhalten im Früh- und Hochsommer, isohydrisches Verhalten im Herbst). Der Feld-Ahorn wiederum regulierte am stärksten zu Beginn und Ende der Vegetationsperiode, zeigte dazwischen jedoch ein anisohydrisches Verhalten. Der Spitz-Ahorn zeigte vor allem im Spätsommer eine isohydrische stomatäre Regulation mit hohen Steigungen bei niedrigen VPD-Werten, die denen der Bäume aus dem trockeneren Lebensbereich ähnlicher war als denen der Arten und Sorten aus dem frischeren Lebensbereich. Die Amerikanische Stadt-Linde hatte, wie die Brabanter Silber-Linde, ein ausgeprägtes Maximum von  $J_s$  im Juni, zeigte jedoch als einzige Art/Sorte eine schwächere Regulation je weiter die Sommerzeit fortgeschritten war. Sie wies von allen Arten und Sorten die am stärksten anisohydrische Regulation des Wasserstatus auf.

Der effizientere Schließmechanismus, welchen Bäume aus trockenen Habitaten häufig aufweisen (Pfadenhauer & Klötzli, 2014, S. 68), und der anhand der vorliegenden Daten weitgehend bestätigt wird, muss in einer Wuchssituation ausreichender Ressourcenversorgung nicht zum Einsatz kommen. Im Gegenteil: aufgrund ihrer höheren Trockenheitstoleranz kann davon ausgegangen werden, dass die Arten und Sorten aus dem trockeneren Lebensbereich sogar eine geringere Regulation der Wasserverluste aufweisen, wenn die Bedingungen – insbesondere die Wasserversorgung – entsprechend günstig sind (Oren et al., 1998). In beiden Versuchsjahren war der Juni im Vergleich zum langjährigen Mittel deutlich zu trocken und die Bodenfeuchte-Werte entsprechend niedrig (Kap. 4.1.1, 4.1.2). Hier wiesen Feld-Ahorn und Hopfenbuche ein stark isohydrisches Verhalten auf. In den Monaten Juli und August, in denen 2016 ausreichend und 2017 sogar überdurchschnittlich viel Niederschlag fiel, hatten sie dann entsprechend weniger abgeflachte Kurvenverläufe im Vergleich zum Juni. Auch ihr Wuchsmaximum erreichten alle drei Arten und Sorten aus dem trockeneren Lebensbereich im sehr regnerischen August 2017 gemeinsam mit dem Spitz-Ahorn, der hier auch ein deutliches Maximum des Wasserverbrauches aufwies (Kap. 4.4.1). Das deutet darauf hin, dass diese Arten und Sorten eine hohe Sensitivität gegenüber atmosphärischer Trockenheit besitzen und ihren Wasserverbrauch

entsprechend einschränken, gleichzeitig aber auch in der Lage sind, die günstigeren Witterungsbedingungen für sich zu nutzen.

Bei einer Studie von Fini et al. (2009) wurde der Effekt der Bewässerung auf das Wuchsverhalten und die physiologischen Reaktionen von jungen Linden und Ahornen getestet. Da aufgrund der geographischen Lage und den hohen Jahresniederschlägen (siehe Kap. 2.3.4) langanhaltende, intensive Trockenphasen unwahrscheinlich sind, können die Ergebnisse mit der Kontrollvariante im vorliegenden Versuch verglichen werden. Bei der Sommer-Linde (*Tilia platyphyllos*) wurden zwischen den beiden Behandlungsvarianten keine Unterschiede im Gaswechsel ausgemacht. Bei der Winter-Linde und der Holländischen Linde (*Tilia x europea*) kam es innerhalb der zweijährigen Messreihe nur im ersten Versuchsjahr zu leichten Einbrüchen bei der Transpiration, ansonsten war der Gaswechsel dieser Arten nicht beeinträchtigt. Die Silber-Linde hingegen wies in beiden Jahren signifikant niedrigere stomatäre Leitfähigkeit und Transpiration in der Kontroll- im Vergleich zur Bewässerungsvariante auf. Aufgrund dieses isohydrischen Verhaltens, welches zu einer Vermeidung von Trockenstress führt, empfehlen die Autoren, die Silber-Linde an schwierigen Standorten zu pflanzen, wie etwa dem Straßenraum, wo die Bodenwasserreserven häufig stark sehr limitiert sind. Die Winter-Linde hingegen, die in beiden Behandlungsvarianten einen sehr hohen Wasserverbrauch zeigte, sahen sie für Wuchsorte vor, in denen ausreichend Bodenwasserreserven zur Verfügung stehen. In der Studie von Gillner et al. (2017) wies die Sorte *Tilia cordata* 'Greenspire' ebenfalls ein anisohydrisches Verhalten auf, hier sichtbar durch sinkende Werte des minimalen Blattwasserpotenzials bei steigendem VPD. Auch die Sorten *Acer platanoides* 'Emerald Queen' und 'Deborah' zeigten – in Folge eines anisohydrischen Verhaltens – wenig Unterschiede im Gaswechsel zwischen den beiden Behandlungsvarianten. Darüber hinaus haben Choat et al. (2012, ergänzendes Material) für die Hainbuche und die Winter-Linde deutlich niedrigere  $\Psi_{50}$ -Werte (Spannung in den Leitgefäßen, bei der 50 % der ursprünglichen Leitfähigkeit verlorengegangen ist; siehe Kap. 2.3.3) im Vergleich zu den beiden Ahornarten angeführt, die sehr ähnliche Werte aufwiesen (Tabelle 11). Sollte diese Resistenz gegenüber Kavitationen den Schwellenwert für den Stomataschluss setzen, ist eine geringere stomatäre Regulation bei Säulen-Hainbuche und Amerikanischer Stadt-Linde

im Vergleich zu den Ahornen zu erwarten, so wie es die Analysen in Kapitel 4.4.2 in der überwiegenden Zahl der Fälle auch bestätigen.

Ein insgesamt sehr reduzierter Gaswechsel für ausgewachsene Spitz- und Bergahorne im Straßenraum wurde an heißen Sommertagen bei der Studie von Gillner et al. (2015a) ermittelt. Diese Arten zeigten bei niedrigen VPD-Werten eine hohe Sensitivität, aber nur leicht abfallende Werte der stomatären Leitfähigkeit bei hoher atmosphärischer Trockenheit, wohingegen beispielsweise bei der ringporigen Rot-Eiche (*Quercus rubra*) der Unterschied viel deutlicher ausgeprägt war zwischen sehr hohen Werten der stomatären Leitfähigkeit bei niedrigem VPD und sehr niedriger stomatärer Leitfähigkeit bei hohem VPD. Die Autoren begründeten die geringe Sensitivität des Spitz-Ahorns bei hoher atmosphärischer Trockenheit mit den relativ hohen Bodenwassergehalten, die bei dieser Messeinheit in 60 cm Bodentiefe konstant über 25 % lagen, und mit der bereits im niedrigen VPD-Bereich hohen Sensitivität. Bei einem forstwissenschaftlichen Trockenstressexperiment mit getopften Pflanzen im Keimlingsstadium am Lehrstuhl für Botanik der Universität Freiburg (Kunz et al., 2016) stuften die Autoren das physiologische Verhalten des Spitz-Ahorns aufgrund einer konstanten Reduktion der stomatären Leitfähigkeit bei zunehmender Trockenheit und seiner hohen Wassernutzungseffizienz als isohydrisch ein.

Die Untersuchungen und die Ergebnisse weiterer Studien zeigen, dass Arten und Sorten Unterschiede hinsichtlich ihrer stomatären Sensitivität aufweisen. Die Einteilung in isohydrische und anisohydrische Wasserverbrauchsmuster gibt Aufschluss darüber, welche arten- und sortenspezifischen Kühleffekte durch Transpiration zu erwarten sind. Ferner werden Strategien im Umgang mit Trockenheit offenbart. Bei Arten und Sorten mit einer empfindlichen stomatären Regulation, wie der Hopfenbuche, ist mit einer geringen Kühlleistung durch Transpiration zu rechnen. Andererseits kann ein sparsamer Wasserverbrauch vor Schädigungen des Wassertransportsystems bei langanhaltender Trockenheit führen, was in dieser spezifischen Wuchssituation die Kühlleistung garantiert. Aufgrund des hohen Informationsgehaltes sollten für bislang selten erforschte Arten/Sorten oder für Arten/Sorten, wie dem Spitz-Ahorn, für die bislang keine eindeutigen Erkenntnisse vorliegen, weitere Forschungen erfolgen.

### 5.2.3 Trockenheitstoleranz und -resistenz

Ein Vergleich zwischen Kontrolle und Trockenvariante zeigte, dass Zuwachs, Wasserverbrauch und die Vitalität von Bäumen stark von der Bodenfeuchtigkeit abhängen. Im Durchschnitt wurden bei den Arten und Sorten aus dem trockeneren Lebensbereich höhere oberirdische Wuchsminderungen und somit eine geringere Resistenz durch die Bodenaustrocknung registriert im Vergleich zu den Bäumen aus dem frischeren Lebensbereich (Kap. 4.5). Darüber hinaus wies die Brabanter Silber-Linde im Vergleich zur Amerikanischen Stadt-Linde eine höhere Schrumpfung der Stammdurchmesser während der wärmsten und strahlungsintensivsten Stunden am Tag auf (Kap. 4.6). Diese stärkere Nutzung des Stammwassers könnte ein Grund dafür sein, dass die Brabanter Silber-Linde in der Trockenvariante ihren Wasserverbrauch auf einem relativ hohen und stabilen Niveau halten konnte im Vergleich zur Amerikanischen Stadt-Linde. Diese zeigte hier die niedrigste Resistenz aller Arten und Sorten. Die höchsten Resistenzwerte bei allen gemessenen Parametern wies der Feld-Ahorn auf (Tabelle 11). Darüber hinaus war die transpirierende Blattbiomasse im Vergleich zum Wurzelsystem relativ niedrig (Kap. 4.2, 4.8) und gemeinsam mit der Regulation der Transpiration bei hohem VPD (Kap. 4.4.2) ergab sich (gemeinsam mit dem Spitz-Ahorn) die zweitniedrigste Transpiration pro Quadratmeter Blattfläche ( $E_L$ ).

Bei der Untersuchung der Trockenbiomasse (Kap. 4.8) wies der Feld-Ahorn in beiden Behandlungsvarianten mit Abstand das höchste Wurzel-Spross-Verhältnis auf. Damit bestätigen die Daten frühere Befunde über den Zusammenhang zwischen dem Niederschlag beziehungsweise der vorherrschenden Bodenfeuchtigkeit in einem Gebiet und der dort anzutreffenden Wurzelbiomasse (Mokany et al., 2006). Auch bei dem Trockenstressexperiment von Kunz et al. (2016) hatte der Feld-Ahorn das mit Abstand höchste Wurzel-Spross-Verhältnis in der Trockenvariante. Da bei diesem Versuch allerdings Keimlinge gemessen wurden, ist der Wert von  $1,46 \text{ g g}^{-1}$  sehr verschieden von dem in dieser Untersuchung gewonnenen ( $0,59 \text{ g g}^{-1}$ ), denn prinzipiell nimmt das Wurzel-Spross-Verhältnis bei Bäumen mit zunehmender Wuchshöhe und Brusthöhendurchmesser, ab (Mokany et al., 2006). In Wäldern und Waldgebieten wurde außerdem eine signifikant negative Korrelation zwischen dem Wurzel-Spross-Verhältnis

und der Bestandsdichte festgestellt (Mokany et al., 2006), was durch einen erhöhten Wettbewerb um das Licht oder eine zunehmende Bodenfeuchtigkeit und höhere Verschattung bei geschlossenem Kronendach begründet werden könnte. Gemeinsam mit der relativ hohen Durchwurzelungstiefe und Dichte des Wurzelsystems (Tabelle 10) wies der Feld-Ahorn ein sehr üppiges Wurzelsystem aus, was ihn offensichtlich dazu befähigte, gut bei Trockenheit bestehen zu können. Das würde auch erklären, warum in der Trockenvariante keine verfrühte Blattseneszenz beziehungsweise Blattfall eingetreten sind und warum relativ hohe Resistenzen beim Trockengewicht, dem Stammwachstum und dem Wasserverbrauch ermittelt wurden. Ein hohes Wurzel-Spross-Verhältnis sollte somit als bedeutendes Kriterium für die Trockenheitstoleranz von Arten und Sorten herausgestellt werden. Auch sein hoher Lichtbedarf (Niinemets & Valladares, 2006; Tabelle 1) und die isolierende Korkrinde (Roloff et al., 2013, S. 178; Uehre & Herrmann, 2017, S. 187) sind typisch für an Hitze- und Trockenheit angepasste Baumarten. Der gesamte Datensatz legt somit nahe, dass diese Art sehr trockenheitstolerant ist.

Der Spitz-Ahorn hatte in der Trockenvariante nach dem Feld-Ahorn das zweithöchste Wurzelgewicht und Wurzel-Spross-Verhältnis. Auf Basis von diesem Ergebnis dürfen jedoch keine Rückschlüsse über die Trockenheitstoleranz der Art getroffen werden, da die Bodenaustrocknung beim Spitz-Ahorn nicht wie geplant funktioniert hat (Kap. 4.1.2). In diesem Fall können somit nur die Ergebnisse der Kontrollbäume interpretiert werden. Hier erreichte der Spitz-Ahorn ebenfalls das zweithöchste Wurzelgewicht (Kap. 4.8) nach dem Feld-Ahorn und unter allen vier Arten und Sorten das dichteste Wurzelsystem, was als positiv für das Bestehen unter Trockenheit gewertet werden kann. Andererseits wies der Spitz-Ahorn aufgrund seines sehr hohen Stammgewichtes das niedrigste Wurzel-Spross-Verhältnis aller vier Arten und Sorten und eine geringe Wassernutzungseffizienz auf (Kap. 4.7), was Hinweise darauf sind, dass diese Baumart nicht sehr trockenheitstolerant ist. Für eine fundierte Beurteilung müssen auch Ergebnisse anderer Studien und Erfahrungen aus der Praxis herangezogen werden. Bei Gaswechseluntersuchungen an *Acer platanooides*, *A. pseudoplatanus*, *Platanus x hispanica*, *Quercus rubra* und *Tilia platyphyllos* an versiegelten Wuchsstandorten in Dresden (Gillner et al., 2015a) hatte der Spitz-Ahorn die niedrigste

Wassernutzungseffizienz. Die Bodenfeuchtwerte waren bei dieser Studie hoch, weshalb nicht von einem Verhalten unter Trockenstress ausgegangen werden kann. Bei Bodentrockenheit wurde hingegen in der forstwissenschaftlichen Studie von Kunz et al. (2016) eine hohe Resistenz im Wachstum und Wasserverbrauch bei Spitz- und Feld-Ahorn ermittelt. In ihrem Trockenstressexperiment mit getopften Pflanzen im Keimlingsstadium zeigte der Spitz-Ahorn bei Gaswechseluntersuchungen keinen signifikanten Einbruch der maximalen Photosyntheserate durch Trockenheit. Bei den beiden Ahornen wurden im Zuge dieser Messungen auch eine hohe Transpiration und eine hohe stomatäre Leitfähigkeit unter Trockenheit festgestellt, wobei der Gaswechsel des Spitz-Ahorns etwas weniger eingeschränkt war als der des Feld-Ahorns. Schließlich verstarb auch kein Individuum dieser Gattung durch den Trockenstress im Gegensatz zu den anderen vier untersuchten Arten Elsbeere (*Sorbus torminalis*), Speierling (*S. domestica*), Trauben-Eiche (*Quercus petraea*) und Rotbuche (*Fagus sylvatica*), was als hohe Resistenz gegenüber Trockenheit und Embolienbildung gewertet wurde. Letztendlich wurde der Feld-Ahorn als etwas resistenter eingestuft. Die hohen Resistenzwerte der Ahorne im Vergleich zu Speierling und Elsbeere aus xerothermen mediterranen Ökosystemen leiteten die Autoren aus der relativ ähnlichen südlichen Verbreitungsgrenze der vier Arten her. Interessanterweise waren es jedoch die am wenigsten resistenten Mehlbeeren, welche sich bei einem erneuten Einsetzen der Bewässerung nach dem Trockenheitsereignis am schnellsten und vollständigsten wieder erholen konnten und sogar deutlich bessere Werte als vor dem Trockenstress aufwiesen (hohe Erholung und Resilienz, siehe Kap. 2.3.3). Auch die  $\Psi_{50}$ -Werte, die die Spannung in den Leitgefäßen angeben, bei der 50 % der ursprünglichen Leitfähigkeit verlorengegangen ist (Kap. 2.3.3), fallen für den Spitz- (-1,8 MPa) und den Feld-Ahorn (-2 MPa) sehr ähnlich aus (Choat et al., 2012, ergänzendes Material), wobei sie eine etwas höhere Toleranz des Feld-Ahorns suggerieren.

Beide Ahornarten haben ein ähnliches Verbreitungsareal, wobei der Feld-Ahorn etwas weiter in den Süden siedelt, der Spitz-Ahorn hingegen weiter in den Norden und in höhere Lagen (Kunz et al., 2016), wodurch er als frosttolerant gilt. Gemäß der in dieser Arbeit verwendeten Klassifikation der Lebensbereiche nach Kiermeier (1992) entstammt der Feld-Ahorn einem mehr dürre-gefährdeten Lebensbereich als der Spitz-Ahorn. Diese Herkunftsunterschiede könnten die leicht unterschiedliche Trockenheitstoleranz

bedingen beziehungsweise Grund für das üppigere Wurzelsystem und die im Vergleich zum Spitz-Ahorn geringere Belaubung des Feld-Ahorns sein (Tabelle 6; Mokany et al., 2006). Die Arten-Rangliste von Niinemets & Valladares (2006; Tabelle 1), bei der der Feld-Ahorn ebenfalls die höhere Trockenheitstoleranz aufweist, bestätigt die vorangegangenen Überlegungen. Auch in der deutschen Forstwissenschaft wird angenommen, dass sich die klimatischen Bedingungen in Bayern in Zukunft zum Positiven für den Feld-Ahorn verändern werden, wohingegen der Spitz-Ahorn aufgrund der steigenden Temperaturen die Grenzen seiner physiologischen Amplitude erreicht hat (Kölling, 2007). Bei Schütt et al. (1994a, *Acer platanoides*) wird dem Spitz-Ahorn eine hohe Toleranz gegenüber zeitweiliger Trockenheit zugeschrieben. Im GALK Straßenbaumtest erscheinen einzelne Sorten als stadtklimafest, wohingegen nach Meinung der Experten der städtischen Baumschule der Spitz-Ahorn auch als reine Art gut bei Hitze- und Trockenheit bestehen kann. Es scheint, dass das physiologische Verhalten des Spitz-Ahorns sehr stark von der Wasserverfügbarkeit im Boden und der jeweiligen Sorte abhängt (Fini et al., 2009), woraus eine große Amplitude der Trockenheitstoleranz resultiert. Die Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Untersuchungen können auch stark variieren in Abhängigkeit davon, ob es sich bei den jeweiligen Messungen um Keimlinge, Jungbäume oder um ausgewachsene Bäume gehandelt hat (Mokany et al., 2006). Davon abgesehen ist von einer genetischen Variabilität innerhalb einer Baumart auszugehen. Zuletzt gibt es auch zwischen den innerstädtischen Wuchsstandorten große lokale Unterschiede. Beispielsweise kann sich eine Baumart oder Sorte im relativ niederschlagsreichen München sehr gut als Straßenbaum eignen, in trockeneren Gegenden Deutschlands jedoch nicht.

Bei der Amerikanischen Stadt-Linde führte die Bodenaustrocknung zu sehr starken Biomasseverlusten, insbesondere bei den Grobwurzeln (Kap. 4.8). Auch die Dichte des Wurzelsystems wurde stark reduziert. Ungeachtet dieser Austrocknungseffekte hatte die Amerikanische Stadt-Linde in der Kontrolle das niedrigste Wurzelgewicht aller vier Arten und Sorten. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Kohlenstoffassimilation beziehungsweise der Gaswechsel durch den Trockenstress insgesamt sehr stark eingeschränkt waren. Wegen den hohen Verlusten in der Biomasse, dem starken Einbruch des Wasserverbrauchs (Kap. 4.4.1, 4.4.2) und der deutlich verfrühten

Verfärbung der Blätter beziehungsweise dem vorzeitigen Blattfall, war die Resistenz dieser Sorte gegenüber Trockenheit nachweislich gering.

Im Jahr 2017 erfolgte durch den Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Technischen Universität München eine Begleituntersuchung zur Feinwurzelproduktion beim Linden-Vergleichspaar (Stratópoulos et al., 2019b; Zhang et al., 2019; 2020). Innerhalb dieser Messkampagne wurde die Entwicklung der Feinwurzelbiomasse in beiden Behandlungsvarianten im Mai (vor dem Start der Bodenaustrocknung), September und November mit Hilfe von Bohrstockproben analysiert. Die Datenaufnahme erfolgte an denselben Bäumen, welche auch in diesem Versuch gemessen wurden. Abb. 30 zeigt ein Ergebnis dieser Untersuchung. In allen vier Kombinationen aus Sorte und Behandlungsvariante wurden zur ersten Messung im Mai ähnlich hohe Werte der Gesamtbiomasse ermittelt. In der tiefsten gemessenen Bodenschicht (20-30 cm) wies jedoch die Amerikanische Stadt-Linde in beiden Behandlungsvarianten signifikant mehr Feinwurzelbiomasse auf als die Brabanter Silber-Linde. Im September erhöhte sich die Feinwurzelbiomasse bei den Kontrollpflanzen der Brabanter Silber-Linde in allen Bodentiefen sehr stark, wohingegen die Feinwurzelbiomasse der Trockenvariante einen vergleichbaren Zuwachs nur in der Bodentiefe 20-30 cm aufwies. Insbesondere in der obersten Bodenschicht (0-10 cm) kam es zu starken Biomasseverlusten. Die Amerikanische Stadt-Linde hatte bereits im Mai relativ viel Feinwurzelbiomasse in der untersten Bodenschicht gebildet, was im Einklang steht mit den Beobachtungen hinsichtlich der Phänologie (Kap. 4.3), dem Wasserverbrauch (Kap. 4.4) und dem Wachstum (Kap. 4.6). Im Anschluss daran kam es aber nicht zu einem vergleichbar hohen Anstieg der Feinwurzelbiomasse wie bei der Brabanter Silber-Linde. Die Trockenvariante der Amerikanischen Stadt-Linde war die einzige der vier Gruppen, bei der es zwischen der ersten und der zweiten Messkampagne insgesamt zu einem Rückgang der Feinwurzelbiomasse durch die Bodenaustrocknung kam. Grund waren Biomasseverluste in den oberen zwei Bodenschichten (0-20 cm). Somit erreichte diese Gruppe im September auch insgesamt die niedrigste Feinwurzelbiomasse aller vier Gruppen.

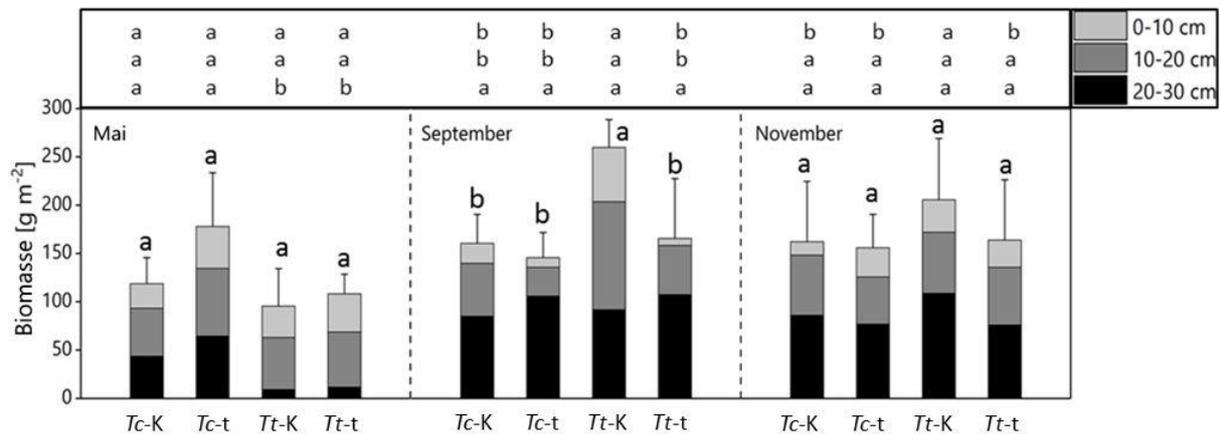


Abbildung 30. Entwicklung der Feinwurzelbiomasse der Linden in beiden Behandlungsvarianten (Kontrolle - K und trocken - t) im Mai (vor Installation der Regenausschluss-Konstruktionen), September und November 2017. Die Balken zeigen die Mittelwerte von jeweils vier Bohrkernen pro Baum in drei unterschiedlichen Bodentiefen. Gruppen, die keinen Buchstaben teilen, haben auf den gesamten Bodenquerschnitt (Hauptgrafik) beziehungsweise in den einzelnen Bodentiefen (oberer Grafikteil) ein signifikant unterschiedliches Trockengewicht aufgewiesen. Für Abkürzungen von Sorten siehe Tabelle 1. Übersetzt aus Stratópoulos et al. (2019b).

Für die sehr niedrigen Xylemflussdichte- beziehungsweise Saftflusswerte (Kap. 4.4.1) und das insgesamt schlechtere Abschneiden der Amerikanischen Stadt-Linde in der Trockenvariante gibt es mehrere Erklärungsansätze. Eine Möglichkeit ist, dass diese Sorte aufgrund ihres sehr schwachen Wurzelsystems eine eingeschränkte Kapazität zur Wasseraufnahme besitzt. Das unterstützen insbesondere die Ergebnisse hinsichtlich der Grobwurzelbiomasse (Kap. 4.8), aber auch der Rückgang der Feinwurzelbiomasse durch die Bodenaustrocknung (Abb. 30). Schütt et al. (1994b, *Tilia cordata*) wiesen darauf hin, dass die Winter-Linde als reine Art mit ihrem wenig ausgedehnten Herzwurzelsystem und häufigen Wurzelverwachsungen einen auffallend kleinen Bodenraum erschließe. Die Autoren führten dies auf eine vergleichsweise geringe Wurzelenergie zurück. Des Weiteren kann angenommen werden, dass sich infolge ihres anisohydrischen Verhaltens Embolien gebildet haben, welche im Verlauf des Sommers den Wassertransport nicht mehr uneingeschränkt möglich machten und zu einem vorzeitigen Welken beziehungsweise Blattfall führten. Zuletzt besitzt diese Sorte auch keine besonderen langfristigen anatomischen Anpassungen an Trockenheit. Während ihre Blattunterseiten beispielsweise nur partiell Behaarung aufweisen, sind diese bei der Brabanter Silber-Linde flächig dicht behaart, was als physikalische Barriere starken

Transpirationsverlusten entgegenwirkt. Unwahrscheinlich ist, dass die Reduktion der Transpiration auf eine hohe stomatäre Regulation zurückzuführen ist (siehe Kap. 4.4.2). Der frühzeitige Blattabwurf passt ebenfalls zu ihrer anisohydrischen Strategie, bei welcher es in langanhaltenden Trockenphasen nach anfänglichem Hochhalten der Transpiration zu einem starken Einbruch dieser kommen kann (Kunz et al., 2016). Eine weitere Eigenschaft, die ihre geringe Trockenheitstoleranz bestätigt, ist ihre hohe Schattentoleranz (Niinemets & Valladares, 2006). Anders stehen die Prognosen für die Winter-Linde im Waldbau, wo sich laut Kölling (2007) ihr klimatisch mögliches Anbaugebiet zukünftig von der Hälfte auf zwei Drittel Bayerns ausdehnen soll. Für den städtischen Raum wird aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse diese positive Einschätzung nicht geteilt.

Ein Abgleich der Ergebnisse der Feinwurzelproduktion (Abb. 30) mit denen des oberirdischen Wachstums (Kap. 4.5) zeigt, dass bei der Brabanter Silber-Linde die Bodenaustrocknung zu einem Rückgang der Feinwurzelbiomasse in den oberen Bodenschichten bei gleichzeitiger Stimulation der Wurzelentwicklung in tiefere Bodenschichten geführt hat. Diese Investition des Wachstums in die tieferen Bodenareale ist auf Kosten des oberirdischen Wachstums und der Feinwurzelproduktion in horizontale Richtung (Zhang et al., 2020) erfolgt oder hat zumindest zu deren Stagnation geführt. Bei ausreichender Ressourcenverfügbarkeit konnten die Kontrollpflanzen hingegen sowohl ober- als auch unterirdisch Kohlenstoff investieren.

Es ist bekannt, dass mit zunehmender Bodentrockenheit die (Fein-)Wurzelbiomasse in manchen Teilen des Bodens abnimmt, wohingegen sich Wurzeln andernorts im Boden ausbreiten und verzweigen können. Dies ist ein Phänomen, welches häufig bei Pflanzen in trockenen Erdregionen mit tiefreichenden Wurzelsystemen zu beobachten ist. Larcher (2001, S. 208) beschrieb ferner, dass Pflanzen in der Lage sind, aktiv die Wasserpotenziale in ihren Wurzeln zu reduzieren, um mehr Bodenwasserreserven nutzen zu können. Xerophyten entwickeln Saugspannungen bis -6 MPa und darunter.

Die begrenzte Messtiefe von 0-30 cm und der begrenzte Messradius von maximal 30 cm bei der Feinwurzel-Messkampagne lassen die Frage offen, ob die Brabanter Silber-

Linde nicht in noch tiefer liegende Bodenareale vorgedrungen ist oder sich weiter in horizontaler Richtung ausgebreitet hat, um Bodenwasserreserven zu nutzen. In jedem Fall ist die Investition des Kohlenstoffs in die Wurzelbiomasse ein Zeichen des Reaktionsvermögens auf zunehmende Bodentrockenheit, durch das der Wasserverbrauch bei der Brabanter Silber-Linde weniger stark einbrach als bei der Amerikanischen Stadt-Linde (Kap. 4.4.1, 4.4.2). Die Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass die Resistenz hinsichtlich des oberirdischen Wachstums alleine kein brauchbarer Indikator für die Trockenheitstoleranz einer Baumart beziehungsweise Sorte ist. Außerdem hat die Brabanter Silber-Linde das im elastischen Rindengewebe gespeicherte Wasser stärker genutzt als die Amerikanische Stadt-Linde und hinsichtlich ihrer Blatteigenschaften sind lang- und kurzfristige Anpassungen an Trockenheit festzustellen, wie die dichte sternförmige Behaarung der Blattunterseite und der Heliotropismus (Roloff et al., 2013, S. 176, 178). Die insgesamt hohe Trockenheitstoleranz der Brabanter Silber-Linde (Tabelle 11) steht im Einklang mit dem Ranking der Trockenheitstoleranz von Niinemets & Valladares (2006) für die reine Art und mit den positiven Erfahrungen bei den Straßenbaumtests (Hiemstra, 2011; LWG, 2019; GALK, 2019).

Die Säulen-Hainbuche zeigte unter Trockenheit die niedrigste Resistenz was die Kompartimente Zweige und Wurzeln und das Wurzel-Spross-Verhältnis betrifft (Kap. 4.8). Offensichtlich investiert diese Sorte unter Trockenheit wenig Kohlenstoff in die unterirdische Biomasse aber auch in der Kontrollvariante stand eine hohe transpirierende Blattmasse (Kap. 4.2) einer relativ geringen versorgenden Wurzelbiomasse gegenüber. Diese Partitionierung sorgt für eine hohe Anfälligkeit gegenüber Trockenheit (McDowell et al., 2008). In der Praxis wird die Hainbuche als reine Art aufgrund ihrer Hitze- und Strahlungsempfindlichkeit nur mit Einschränkung empfohlen und es wird davon abgeraten, sie auf befestigten Flächen zu verwenden (GALK, 2019). Im Vergleich zur reinen Art zeigen sich im urbanen Kontext die Sorten 'Fastigiata' und 'Frans Fontaine' weniger hitze- und strahlungsempfindlich (GALK, 2019). Im Projekt Stadtgrün 2021 (LWG, 2019) fällt die Sorte 'Frans Fontaine' ebenfalls positiv auf. Beim Ranking der Trockenheitstoleranz von Niinemets & Valladares (2006; Tabelle 1) wurde der Hainbuche die schlechteste Trockenheitstoleranz zugeschrieben.

Im Waldbau wird hingegen, wie bei der Winter-Linde, angenommen, dass sich das Klima zu ihren Gunsten entwickeln wird (Kölling, 2007). Anhand der Datengrundlage, insbesondere aufgrund des sehr niedrigen Wurzel-Spross-Verhältnisses und des anisohydrischen Verhaltens, wird die Hainbuche als reine Art und Sorte als wenig trockenheitstolerant eingestuft, wobei bei den Sorten weniger Schäden durch Hitze und Trockenheit zu erwarten sind.

Zuletzt kann die positive Einschätzung der Hopfenbuche im Ranking von Niinemets & Valladares (2006; Tabelle 1) durch die Erfahrungen im Trockenstressexperiment bestätigt werden. Ihr isohydrisches Verhalten und der starke Einbruch beim oberirdischen Wachstum weisen darauf hin, dass diese Baumart unter Trockenheit ihre Ressourcennutzung stark einschränkt beziehungsweise wie die Brabanter Silber-Linde einen Teil des assimilierten Kohlenstoffes in den Aufbau der Wurzelbiomasse investiert hat. Letzteres kann aufgrund der fehlenden Daten jedoch nicht überprüft werden. Die Erfahrungen in den Straßenbaumtests sind ebenfalls positiv (GALK, 2019; LWG, 2019). Im Projekt Stadtgrün 2021 wird sie unter anderem aufgrund ihrer Anspruchslosigkeit als besonders aussichtsreicher Zukunftsbaum eingestuft. Die wärmeliebende Baumart ist wie der Feld-Ahorn langsam wachsend. Feld-Ahorn und Hopfenbuche bleiben mit 10-15 m Wuchshöhe als Straßenbaum (GALK, 2019) beziehungsweise 10-20 m in der freien Landschaft (Roloff & Bärtels 2006, S. 71, 461) deutlich hinter den Großbäumen Spitz-Ahorn, Amerikanische-Stadt- und Brabanter Silber-Linde, welche zwischen 15 und 30 m hoch werden, zurück. Bei der Klassifikation von Roloff & Bärtels (2014, S. 461) trägt die Hopfenbuche als einzige der sechs Arten und Sorten das Prädikat "Kleinbaum", worunter Bäume fallen, die nur 7-15 m groß werden.

Im Drei-Strategien-Modell nach Grime (2001) können Feld-Ahorn und Hopfenbuche aus dem Lebensbereich Steppengehölze und Trockenwälder demnach den langlebenden und langsam wachsenden *stress-tolerators* zugeordnet werden, welche aufgrund ihres Habitus auch bei widrigen Umweltbedingungen gut bestehen können. Die Amerikanische Stadt-Linde und Säulen-Hainbuche aus artenreichen Wäldern und Gehölzgruppen (Lebensbereich 3) verhalten sich deutlich gegensätzlich. Durch ihren verschwenderischen Ressourcenverbrauch und die fehlenden Schutzmechanismen

gegenüber Trockenheit können sie dieser leicht zum Opfer fallen. Die Brabanter Silber-Linde bildet aufgrund ihrer genetischen Konstellation (artfremde Wurzelunterlage) eine Mischform aus beiden Strategietypen.

### **5.3 Zielkonflikt zwischen Trockenheitstoleranz und Kühlpotenzial**

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse des Regenausschlussexperiments einerseits und gemessener sowie der Literatur entnommener Parameter, die das Kühlpotenzial von Bäumen beeinflussen, andererseits (Tabelle 11), zeigt den Zielkonflikt (engl. *trade-off*) zwischen Trockenheitstoleranz und Kühlleistung auf. Beim Feld-Ahorn wird dieser *trade-off* am deutlichsten sichtbar: aufgrund seiner relativ niedrigen Blattfläche und Wuchshöhe wies er - gemeinsam mit der Hopfenbuche - ein niedriges Kühlpotenzial auf, zeigte jedoch in Bezug auf den Blattfall, das Wachstum und den Wasserverbrauch die höchsten Resistenzen und das stärkste Wurzelsystem (Kap. 4.8). Beim Feld-Ahorn wird deutlich, wie vor allem langfristige genetisch fixierte Anpassungen (Kap. 2.3.3) das Kühlpotenzial sowohl durch Verschattung als auch durch Transpiration limitieren.

Bei der Hopfenbuche wirken sich der Habitus mit einer relativ lichten Krone und der relativ geringe Blattflächenindex (Kap. 4.2) ebenfalls negativ auf das Kühlpotenzial aus. Es sind aber auch die unmittelbaren, kurzfristigen Reaktionen (Roloff et al., 2013, S. 176f.), welche unter Trockenheit ihr Kühlpotenzial durch Transpiration noch zusätzlich einschränken im Vergleich zum Feld-Ahorn. Aufgrund ihres stark isohydrischen Verhaltens (Kap. 4.4.2) ist mit sehr geringen Wasserverbrauchswerten zu rechnen.

Nicht sichtbar wurde der *trade-off* bei der Brabanter Silber-Linde. Als einzige Sorte aus dem Lebensbereich Steppengehölze und Trockenwälder und gepfropft auf eine artfremde Wurzelunterlage wies sie sowohl eine hohe Trockenheitstoleranz als auch ein sehr hohes Kühlpotenzial auf. Zum einen lag es daran, dass diese Sorte sehr dicht belaubt war (Kap. 4.2). Die sehr hohen Wasserverbrauchswerte ( $E_L$ ) und die dichte Belaubung bedingten darüber hinaus eine hohe Transpiration beziehungsweise Kühlleistung, was im Einklang mit den Erfahrungen bei den Münster-Wolbecker Sichtungsversuchen von 2008-2011 und 2012 (Uehre & Herrmann, 2017) steht. Andererseits zeigte die Brabanter Silber-Linde – ähnlich wie die Hopfenbuche – einen

starken Einbruch des oberirdischen Wachstums, was sich zugunsten einer stärkeren (Fein-)Wurzelproduktion auswirkte (siehe Abb. 30).

Tabelle 11. Gegenüberstellung von Kühlpotenzial und Trockenheitstoleranz unter Berücksichtigung der Phänologie (Eintrittszeitpunkt Blattfall), des Blattflächenindex (LAI), des Stammwachstums, der Wuchshöhe, der Kronenbreite, des Wasserverbrauches (Xylemflussdichte,  $J_s$  und Wasserverbrauch pro Quadratmeter Kronenfläche,  $E_L$ ) und der Wassernutzungseffizienz (WUE). Die Beurteilung erfolgte nach Schulnotensystem. Aufgrund größerer Stichprobenzahl stammen die LAI- und  $E_L$ -Daten aus dem Jahr 2016. Daten zur Wuchshöhe und Kronenbreite wurden der Literatur entnommen. Für Arten- und Sortenkürzel siehe Tabelle 1.

<b>Kühlpotenzial</b>				
Art/Sorte	Erhobene Daten		Erfahrungswerte <sup>1</sup>	
	LAI	$E_L$	Wuchshöhe	Kronenbreite
<i>Ap</i>	3	4	1	1
<i>Ac</i>	6	4	5	3
<i>Cb</i>	1	3	4	6
<i>Oc</i>	4	5	6	5
<i>Tc</i>	5	2	3	4
<i>Tt</i>	2	1	2	2

<b>Trockenheitstoleranz</b>				
Art/Sorte	Resistenz			WUE
	Phänologie	$J_s$	Wachstum	
<i>Ap</i>	--	--	--	5
<i>Ac</i>	1	1	1	4
<i>Cb</i>	2	3	4	3
<i>Oc</i>	3	3	5	1
<i>Tc</i>	5	4	2	6
<i>Tt</i>	4	2	3	2

<sup>1</sup>nach GALK (2019) und Roloff & Bärtels (2014)

Ein hohes Kühlpotenzial zeigte auch der Spitz-Ahorn mit seiner ebenfalls dichten Belaubung und den größten Dimensionen mit einer maximalen Wuchshöhe von 30 m und einer durchschnittlichen Kronenbreite von 15-22 m (Roloff & Bärtels 2006, S. 85; GALK, 2019). Allerdings verbrauchte der Spitz-Ahorn deutlich weniger Wasser als die Brabanter Silber-Linde (Kap. 4.4.1-4.4.3), wodurch die Kühlleistung durch Transpiration niedriger einzustufen ist.

Bei der Säulen-Hainbuche führte hauptsächlich die dichte Belaubung (Kap. 4.2) zu einem mittleren Kühlpotenzial. Die Amerikanische Stadt-Linde war relativ licht belaubt, verbrauchte jedoch pro Quadratmeter Blattfläche ähnlich viel Wasser wie die Brabanter Silber-Linde (Kap. 4.4.3), was ihr ein höheres Kühlpotenzial als Feld-Ahorn und Hopfenbuche verlieh. Hingegen zeigte sie die niedrigste Trockenheitstoleranz, insbesondere aufgrund des deutlich verfrühten Blattfalls und weil sie die niedrigste Wassernutzungseffizienz aller sechs Arten und Sorten aufwies.

Die Gültigkeit der *trade-off*-Hypothese beschränkte sich auf Wuchssituationen ausreichender Bodenwasserverfügbarkeit und kurzen Phasen atmosphärischer Trockenheit. Bei langanhaltender, starker Trockenheit wurden jedoch die zu einer höheren Trockenheitstoleranz befähigenden Eigenschaften zu einer Grundvoraussetzung für die Gewährleistung eines konstanten, wenn auch niedrigen Kühlpotenzials. Beispielsweise wird sich das Kühlpotenzial des Feld-Ahorns in langen Trockenphasen nicht deutlich von dem bei ausreichend Bodenwasserverfügbarkeit unterscheiden, denn aufgrund der hohen Resistenzwerte (Tabelle 11) sind nur geringe Einbrüche in der Transpiration und der Biomasseproduktion zu erwarten. In dieser spezifischen Wuchssituation können somit Arten und Sorten mit Anpassungen an Trockenheit (z.B. hohes Wurzel-Spross-Verhältnis) sogar ein höheres Kühlpotenzial erreichen als Arten und Sorten aus frischeren Lebensbereichen. Art- und sortenspezifische Kühlpotenziale müssen folglich in Abhängigkeit von der jeweiligen Wuchssituation (langanhaltende Trockenheit oder moderate Bedingungen mit kurzen Trockenphasen) eingeschätzt werden.

#### *Generalisierbarkeit der Ergebnisse*

Die Untersuchungen zeigten, dass Arten und Sorten aus dem frischeren Lebensbereich im Schnitt ein höheres Kühlpotenzial aufwiesen als die Arten und Sorten aus dem trockeneren Lebensbereich. Von hohem Interesse ist, ob diese Beobachtung auch für weitere Vertreter der unterschiedlichen Lebensbereiche gültig ist. Die Metaanalyse von Rahman et al. (2020) (siehe Kap. 1.2) bestätigte, dass, sowohl hinsichtlich der Verschattung als auch hinsichtlich der Kühlung durch Transpiration, Gehölze aus

artenreichen Wäldern und Gehölzgruppen ein höheres Leistungspotenzial aufweisen als Gehölze aus Steppengehölzen und Trockenwäldern. Es konnte ferner gezeigt werden, dass Bäume mit dünnen, dunkelgrünen Blättern die höchste Kühlung bewirken. Da Gehölze aus Gebieten mit hoher Evapotranspirationsbelastung häufig eine geringere spezifische Blattfläche aufweisen als Gehölze aus frischeren Habitaten (Kap. 2.3.3) ist das ein weiterer Hinweis darauf, dass trockenheitsadaptierte Gehölze ein geringeres Kühlpotenzial aufweisen. Somit sind die im Rahmen der hier vorliegenden Dissertation dargestellten Ergebnisse generalisierbar. Die Pflanzung an Trockenheit angepasster Arten und Sorten bedingt bei moderaten Wuchsbedingungen niedrigere Kühlleistungen.

Es soll allerdings nochmals darauf hingewiesen werden, dass Sorten mit artfremden Unterlagen, wie die Brabanter Silber-Linde, ein bislang kaum untersuchtes Potenzial bieten könnten, diesen Zielkonflikt aufzulösen. Die Idee der *trade-offs* beziehungsweise die Ansätze zur Einteilung von Pflanzen in unterschiedliche Existenzstrategien (Grime, 2001; Lösch, 2001, S. 389) argumentieren auf Basis evolutionärer Prozesse, welche zu der Entwicklung der ein- oder anderen Existenzstrategie geführt haben sollen. Nicht bedacht ist bislang jedoch die Rolle, welche die Pflanzenzüchtung in diesem Zusammenhang spielt. Gelten bei Sorten dieselben Gesetzmäßigkeiten im Sinne der *trade-offs* wie bei reinen Arten? Das Beispiel der Brabanter Silber-Linde mit ihrem hohen Wasserverbrauch ließ vermuten, dass durch Selektion möglicherweise einige Anpassungen an Trockenheit nicht mehr in Erscheinung treten, wodurch der Zielkonflikt zwischen Trockenheitstoleranz und Kühlpotenzial aufgehoben werden könnte.

#### **5.4 Verwendungshinweise für bestmögliche Kühlleistung**

Unter den *stress-tolerators* Feld-Ahorn und Hopfenbuche besaß der Feld-Ahorn ein höheres Kühlpotenzial durch Transpiration, weil er einen weniger stark regulierten Wasserverbrauch aufwies als die Hopfenbuche. Da gemäß des momentanen Wissensstandes der Verschattung jedoch ein höherer Beitrag für die Kühlleistung zugeschrieben wird (Shashua-Bar & Hoffman, 2000) und nur gesunde Vegetation hohe Regulationsleistungen erbringen kann, sind sowohl der Feld-Ahorn als auch die Hopfenbuche geeignete künftige Stadtbaumarten, welche einen Beitrag für die Regulation des städtischen Mikroklimas leisten können. Die Toleranz des Feld-Ahorns

und der Hopfenbuche gegenüber langanhaltender Trockenheit und die daraus resultierende Eignung für prekäre Wuchsorte (siehe auch Hiemstra (2011)) werden in der Zukunft unverzichtbar sein.

Der Fall der Brabanter Silber-Linde zeigte, dass auch ein trockenheitstolerantes Gehölz ein hohes Kühlpotenzial aufweisen kann und ferner, dass sich durch die Kombination einer sehr starkwüchsigen Sorte mit der Wurzelunterlage einer heimischen Baumart interessante Koppelleffekte ergeben könnten. Die Sorte ist sehr dicht belaubt, weist hohe Wuchs- und Wasserverbrauchsraten auf und kann Wuchshöhen von Großbäumen erreichen (Roloff & Bärtels, 2014, S. 695; GALK, 2019). Sie ist somit ein vielversprechender „Allrounder“. Diese Beobachtungen könnten den Anlass dazu geben, die Möglichkeiten der Pflanzenzüchtung für klimaangepasste Stadtbaumsortimente künftig stärker in den Fokus zu rücken. Gepflanzt werden kann die Brabanter Silber-Linde an moderat dürreanfälligen Standorten. Allerdings sollten diese aufgrund des relativ hohen Wasserverbrauches und der bevorzugten Feinwurzelentwicklung in die Tiefe (Stratópoulos et al., 2019a; Zhang et al., 2019; 2020) eine ausreichende Durchwurzelungstiefe und Wasserspeicherkapazität aufweisen.

Die Amerikanische Stadt-Linde weist als Jungbaum einen unregelmäßigen und lichten Kronenaufbau aus. Dies ändert sich jedoch im Alter zugunsten einer üppiger belaubten (GALK, 2019) und regelmäßigeren Krone und somit steigt auch die Verschattungsleistung. Der stark anisohydrische Wasserverbrauch sorgt wiederum für ein hohes Kühlpotenzial durch Transpiration. Eine geringere stomatäre Regulation im Falle starker andauernder Trockenheit birgt jedoch ein hohes Risiko für Schäden oder gar das Absterben der Pflanze durch Kavitationen und sorgt für einen Einbruch der physiologischen Funktionen der Pflanze, sowie verfrühtes Welken und Blattfall. Ein frühzeitiger Blattabwurf infolge starker Trockenheit ist in jedem Fall nachteilig – für die Kühlleistung aber allen voran auch für die Pflanze selbst. Wiederholt sich dieses Phänomen aufgrund wiederkehrender Trockenheit über mehrere Jahre, kann dies die Bäume daran hindern, ausreichend Reservestoffe zu akkumulieren, es wird zu Wachstumseinbußen und letztendlich auch zum Absterben der Pflanzen kommen.

Empfohlen wird daher, die Amerikanische Stadt-Linde nur an Standorten zu pflanzen, an denen ausreichend Bodenwasser gespeichert werden kann und/oder Substrate mit einem guten Wasserrückhaltevermögen bei gleichzeitiger Wahrung einer ausreichenden Bodendurchlüftung verwendet werden. Hier kann sie einen hohen Beitrag zur Regulation des Stadtklimas leisten. An dürreanfälligen Standorten ist hingegen mit der niedrigsten Kühlleistung aller sechs Arten und Sorten zu rechnen. Der Fall der Amerikanischen Stadt-Linde zeigt erneut, dass das Kühlpotenzial in Abhängigkeit von der jeweiligen Wuchssituation bewertet werden muss.

An günstigen Standorten und im Fall identischer Dimensionen kann die Säulen-Hainbuche aufgrund ihrer sehr hohen Blattbiomasse noch höhere Kühlleistungen erbringen als die Amerikanische Stadt-Linde. Hinsichtlich der Verschattung könnte sich dies jedoch im Alter relativieren, wenn die im Jungbaumstadium ehemals kompakten säulen- bis kegelförmigen Kronen ihre geschlossene Form verlieren und Rundkronen bilden (GALK, 2019). Ihre geringe Trockenheitstoleranz manifestierte sich, im Gegensatz zur Amerikanischen Stadt-Linde, nicht durch frühzeitiges Welken oder Blattfall. Daher ist davon auszugehen, dass die Säulen-Hainbuche unter Trockenstress zumindest eine höhere Verschattung leisten kann. Aufgrund ihrer geringen Trockenheitstoleranz sollte sie, wie auch die Amerikanische Stadt-Linde, jedoch nicht an dürreanfälligen Standorten gepflanzt werden.

Der Spitz-Ahorn ist schließlich eine Baumart, welche hauptsächlich aufgrund ihres Habitus ein hohes Kühlpotenzial erreichte (Tabelle 11). Die vorliegenden Daten zum Wasserverbrauch und die Ergebnisse der Studie von Kunz et al. (2016) weisen jedoch eher auf ein isohydrisches Verhalten dieser Baumart hin, weshalb die Kühlleistung durch Transpiration bei gleicher Blattbiomasse geringer ausfallen könnte als bei Säulen-Hainbuche oder Amerikanischer Stadt-Linde.

## 5.5 Methodendiskussion

Aufgrund der weitgehend homogenen Wuchsbedingungen, der Einheitlichkeit der Pflegemaßnahmen (Rückschnitt, Düngung etc.) sowie der Herkunft des Pflanzguts (Kap. 3.2) stellte die städtische Baumschule München-Laim einen geeigneten Versuchsstandort für einen Vergleich zwischen Arten und Sorten dar. Im Rahmen des ausgedehnten Trockenstressexperimentes im zweiten Versuchsjahr konnte unter anderem das Verhalten von bislang kaum untersuchten, nichtheimischen Gehölzen detailliert abgebildet werden.

Für allgemeingültige Aussagen über die Trockenheitstoleranz und das Kühlpotenzial von Straßenbäumen bedarf es einer breiten Datenbasis. Wie in den meisten wissenschaftlichen Studien war die Anzahl der untersuchten Arten und Sorten jedoch auf einige wenige beschränkt, denn Vergleichsstudien dieser Form sind sehr kosten- und ressourcenintensiv und schwierig durchzuführen. Das Messdesign in der städtischen Baumschule München-Laim beschränkte sich ferner auf die Reaktionen von Jungbäumen an vollsonnigen Standorten, fernab der (negativen) Einflüsse, die städtische Wuchsstandorte mit sich bringen (Kap. 2.3.1), und in einem Gebiet mit relativ hohen Niederschlägen. Aufgrund von bereits existierenden Münchner Studien zur Trockenheitstoleranz und den Kühlleistungen von Stadtbäumen in realen städtischen Wuchssituationen (Moser et al., 2017; Rahman et al., 2017a; 2017b; 2018; 2019; Moser-Reischl et al., 2019), erschien ein ergänzender Forschungsansatz jedoch als geeignet. Eine systematische Bodenaustrocknung, wie sie in der Baumschule erfolgte, ist in der Stadt nur schwierig umzusetzen und aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren und der Inhomogenität des innerstädtischen Pflanzbestandes sind Wirkungsmechanismen schwieriger zu erfassen. Durch die kontrollierten Feldexperimente und durch Messungen unter realen städtischen Bedingungen entsteht ein umfassendes Bild über das Verhalten von Arten und Sorten unter verschiedenen standörtlichen Gegebenheiten und bei wechselnden Umweltbedingungen. Die Ergebnisse der hier vorliegenden Studie sind somit ein wichtiger Baustein, um eine breite Datenbasis aufzubauen und fundierte Eignungsempfehlungen aussprechen zu können.

Neben der Beschränkung auf sechs Arten und Sorten sind auch die geringe Stichprobenzahl der gemessenen Bäume pro Art/Sorte und ihre räumliche Nähe im

Versuch als Limitationen der Studie darzustellen. Pro Behandlungsvariante wurden sechs (2016) beziehungsweise drei bis vier (2017) zumeist benachbarte Bäume für Messungen ausgewählt. Aufgrund der Anfälligkeit der Xylemflusssensoren konnte diese Stichprobenzahl jedoch nicht durchgehend bewahrt werden. Hinzu kamen Datenlücken aufgrund von Unterbrechungen in der Stromversorgung und somit einem Ausfall der Messinfrastruktur. Die räumliche Nähe der untersuchten Bäume war insbesondere beim Spitz-Ahorn nachteilig, da 2016 alle gemessenen Individuen und 2017 alle Individuen der Trockenvariante durch die Staunässe (Kap. 4.1.2) beeinträchtigt wurden. Das führte dazu, dass keine verlässlichen Aussagen über das Verhalten des Spitz-Ahorns unter langanhaltender Trockenheit getroffen werden konnten. Aus diesem Anlass wird für Folgeuntersuchungen - sofern es die finanziellen Mittel zulassen - ein randomisiertes Untersuchungsdesign mit ausreichend Entfernung zwischen den einzelnen Untersuchungsbäumen empfohlen. Damit könnten auch etwaige Zweifel ausgeräumt werden, ob es sich bei den gemessenen Individuen um unabhängige Wiederholungen handle.

Zuletzt geben die Erfahrungen während der Messkampagnen Anlass zu einer kontroversen Diskussion über die Wahl geeigneter Messtechnik. Trotz ihrer offensichtlichen Limitierungen (kein echtes Nullsignal, nur ein Messpunkt), die zu einer Über- oder Unterschätzung des Wasserverbrauchs führen (Kap. 3.8.3), werden die verwendeten Granier-Sensoren auch retrospektiv als die beste Option für das konzipierte Untersuchungsdesign angesehen. Ein Grund ist, dass wegen ihres relativen niedrigen Preises mehr Individuen pro Art/Sorte gemessen werden können als mit alternativen Messmethoden. Außerdem sind bei Jungbäumen keine ausgeprägten Radialprofile entlang des Stammquerschnittes zu erwarten, wodurch ein Messpunkt pro Sensor als ausreichend erachtet wird. Insbesondere den Blatt-Porometern oder Gaswechsellmesssystemen, welche ebenfalls häufig bei Stadtbaumstudien verwendet werden, ist bei Jungbäumen die Granier-Technik vorzuziehen. Bei ihnen wird die Transpiration auf Blattebene gemessen und verlangt somit eine anschließende Hochskalierung der Werte auf die gesamte Krone, sofern man Aussagen zum Gesamtwasserverbrauch eines Baumes treffen möchte. Gerade hier liegt nach Erfahrungen aus den zurückliegenden Messkampagnen eine sehr große Fehlerquelle. Die indirekte Messung des Blattflächenindex (LAI) über optische Verfahren bei isoliert

stehenden Jungbäumen entbehrt häufig einer akkuraten Abschätzung der tatsächlichen Blattfläche. Eine große Herausforderung war, die zum Teil sehr schmalen Baumkronen (besonders schwierig messbar bei der Säulen-Hainbuche) in das Sichtfeld des optischen Sensors zu bekommen ohne gleichzeitig auch Bereiche des Himmels außerhalb der Baumkronen mit aufzunehmen. Bislang gibt es jedoch keine guten Alternativen zur akkuraten Messung des LAI für diese spezifische Situation. Die LAI-Messergebnisse für isoliert stehende Jungbäume sind auf jeden Fall häufig stark zweifelhaft bis unbrauchbar und bilden somit keine gute Grundlage zur Hochskalierung von Gaswechsellmessergebnissen von Blatt- auf Baumebene. Ungeachtet dessen wird aber durchaus empfohlen, Gaswechsellmesssysteme oder zu einer höheren Preisklasse gehörende spezialisierte Xylemflusssensoren (Kap. 3.8.3) ergänzend einzusetzen, sofern detaillierte Informationen zum Wasserhaushalt gewonnen werden sollen.

Schlussendlich gibt es ein deutliches Optimierungspotenzial für die Bestimmung der Bodenfeuchte in Folgeuntersuchungen mit ähnlichen Verhältnissen, wie sie in der Baumschule vorgefunden wurden. Für Trockenstressexperimente sollten nicht nur Sensoren zur Bestimmung des volumetrischen Bodenwassergehaltes eingesetzt werden, sondern auch Tensiometer oder Watermark-Sensoren zur Messung der Saugspannung. Damit könnte man Informationen sowohl zum pflanzenverfügbaren Bodenwasser als auch zum absoluten Bodenwassergehalt erhalten (Kap. 3.7.1). Für künftige Messungen sollte auch der Einbau der Sensoren möglichst früh im Jahr bei feuchten Bodenverhältnissen erfolgen, damit Ausfälle und falsche Messergebnisse, wie sie bei den kontinuierlich messenden HS-10 Sensoren im Jahr 2017 häufig auftraten, vermieden werden können. Allerdings schadeten mutmaßlich auch die zunehmende Verdichtung und Verhärtung des Bodens infolge der intensiven Bodenaustrocknung im zweiten Versuchsjahr den Sensoren, denn laut Herstellerangaben kann exzessive Bodenverdichtung substantiell die Messergebnisse beeinflussen. Zum Zeitpunkt der Versuchskonzeption gab es für die verwendeten HS-10 Sensoren jedoch keine preisgünstige Alternative. In trockenen Weinbaugegenden werden mit Tensiometer-Sensoren und pF-Metern aktuell gute Erfahrungen gemacht. Zugunsten verlässlicherer Messergebnisse sollten diese zu einer höheren Preisklasse gehörenden Messgeräte mindestens ergänzend eingesetzt werden.

## 6 Schlussfolgerungen

Das übergeordnete Ziel der Arbeit war es herauszufinden, welche Rolle die Herkunft für das Kühlpotenzial von Straßenbäumen hat. Dafür wurden sechs in München häufig gepflanzte Straßenbaumarten und -sorten aus zwei kontrastierenden Lebensbereichen unter Anwendung ökophysiologischer, wachstumkundlicher und optischer Messmethoden untersucht. Die Lebensbereiche dienten dabei als Indikator für die jeweilige Stressbelastung im ursprünglichen Lebensraum.

Es stellte sich heraus, dass die nachweislich höhere Trockenheitstoleranz der Arten und Sorten aus Steppengehölzen und Trockenwäldern, welche sich in messbaren kurz- und langfristigen Anpassungen manifestierte, einer hohen Kühlleistung entgegenwirken kann. Dies war jedoch nur bei den reinen Arten der Fall, während die Brabanter Silber-Linde als getestete Sorte sowohl ein hohes Kühlpotenzial als auch eine hohe Trockenheitstoleranz aufwies. Unter starker Trockenheit zeigte sich jedoch, dass die geringere Kühlleistung, die zugunsten einer höheren Trockenheitstoleranz in Kauf genommen werden muss, einen sinnvollen Kompromiss darstellen kann. Die an eine hohe Wasserversorgung angepassten Bäume erlitten hingegen zum Teil so starke Vitalitätsverluste, dass ihr ursprünglich hohes Kühlpotenzial hinter das der trockenheitstoleranten Bäume zurückfiel. Abgesehen vom ursprünglichen Lebensraum erwiesen sich die Kronenstrukturparameter als entscheidende Einflussparameter für das Kühlpotenzial von Arten und Sorten.

### *Weiterer Forschungsbedarf*

Weitere Studien sind wünschenswert, um die Unterschiede der Reaktionen von Arten und Sorten auf sich ändernde Umweltbedingungen und insbesondere Trockenheit verstehen zu können. Dabei gilt es vor allem, die Wissenslücken bezüglich des Verhaltens bislang selten gepflanzter und untersuchter Baumarten und Sorten zu schließen. Die künftige Stadtbaumforschung zur Dürreanpassung sollte in systematischer Weise Forschungsergebnisse mit unterschiedlichen Untersuchungsdesigns generieren und integrieren. Ausgangspunkt sollten nach wie vor Studien im städtischen Bereich sein, denn das ist der reale Lebensraum mit all seinen

Einflüssen, denen Stadtbäume ausgesetzt sind. Hier werden Beobachtungen erfolgen, die im Anschluss durch Feldexperimente, wie dem hier gezeigten Baumschulversuch, detaillierter und mit hinsichtlich ihrer Komplexität reduzierten Einflussfaktoren untersucht werden können. Das Regenausschlussexperiment zeigte, dass Trockenstressexperimente mit relativ wenig Konstruktionsaufwand durchführbar sind. Ähnliche Versuchsaufbauten sollten für die Messungen weiterer Arten und Sorten erfolgen und dabei die Vorteile homogener Wuchsbedingungen in Baumschulen genutzt werden. Ein Fortschritt wäre es, unter diesen vergleichbaren Bedingungen die Austrocknungstoleranz von Arten und Sorten, beispielsweise durch Messung der  $\Psi_{50}$ -Werte (Kap. 2.3.3), zu ermitteln und im Rahmen dessen art- und sortenspezifische Verwundbarkeitskurven abbilden zu können. Ein nächstmöglicher Schritt im Sinne der Kontrollierbarkeit der Versuchsbedingungen wären ergänzende Trockenstressexperimente mit getopften Sämlingen oder Jungbäumen beziehungsweise Klimakammerexperimente. Bei Topfexperimenten könnten zur Ermittlung des Wasserverbrauches einfache gravimetrische Messmethoden angewandt werden, die den Wasserverbrauch mit einer höheren Unmittelbarkeit abbilden und deutlich kostengünstiger sind als invasive Verfahren oder Gaswechsellmessungen. Zuletzt wären auch genetische Analysen zur Trockenheitstoleranz von Stadtbäumen anzudenken, wie sie aufgrund der Klimawandelproblematik in der Landwirtschaft bereits zahlreich erfolgen. In Modellierungsstudien, bei denen explizit ökophysiologische Informationen über Stadtbäume Berücksichtigung finden, sollten die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Experimenten schließlich integriert und für unterschiedliche Maßstabsebenen nutzbar gemacht werden.

Die Ermittlung von Strukturparametern, wie dem Blattflächenindex oder den Kronendimensionen, ist weiterhin sehr bedeutsam, da sie die wichtigsten die Regulationsleistung bestimmenden Eigenschaften sind (Gómez-Muñoz et al., 2010; Peters et al., 2010; Armson et al., 2013a; Gillner et al., 2015b; Rahman et al., 2018; 2019). Umso gravierender ist es, dass diese relativ einfach zu messenden Basisdaten kaum vorhanden beziehungsweise nicht für die Praxis nutzbar sind. Darüber hinaus ist die Frage zu beantworten, was erhöhte atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für die Leistungen und die Gesundheit von Stadtbäumen bedeuten. Die Studie von Pretzsch et

al. (2017; Kap. 2.3.4) konnte zeigen, dass gestiegene CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bislang zu einer Zunahme des Wachstums von Stadtbäumen geführt haben, was die negativen Auswirkungen von Temperaturanstiegen und zunehmender Trockenheit momentan (noch) ausgleicht. Anzunehmen ist ferner, dass die Stomata der Bäume stärker geschlossen bleiben werden, wodurch sich die Wassernutzungseffizienz erhöht. Jedoch könnte dadurch auch der Hitzestress zunehmen, was eine reduzierte Kühlleistung durch Transpiration zur Folge hätte.

Eine bedeutende Errungenschaft läge auch in einer fundierten Quantifizierung der Anteile der Einzelmechanismen Verschattung und Transpiration an der Abkühlungsleistung von Arten und Sorten (ggf. mit Hilfe von Modellversuchen). Dafür müsste vor allem die Datenbasis zum Wasserverbrauch von vielen verschiedenen Arten und Sorten erweitert werden. Sollte sich jedoch bestätigen, dass der Verschattungseffekt der dominierende Mechanismus für die Regulation des Mikroklimas ist, sollten art-/sortenspezifische Kronenstrukturparameter, geeignete Pflegemaßnahmen und die Trockenheitstoleranz von Baumarten und Sorten im Fokus künftiger Forschung stehen. Andererseits könnte auf gesamtstädtischer Maßstabsebene (Wärmeinseleffekt) die Transpiration bedeutender sein, da durch sie ein hoher Anteil der kurzwelligen Strahlungsenergie in latente Wärme umgewandelt wird (Brown & Gillespie, 1995, S. 47). Eine integrierte Betrachtung sowohl der kleinräumigen als auch der großräumigen klimatischen Effekte durch Stadtbäume und daraus abgeleitete Handlungsempfehlungen wären von hohem Nutzen. Vor allem gibt es aber im Bereich der Stadtbaumforschung eine große Datenlücke, was die unterirdische Biomasse, das Wurzel-Spross-Verhältnis von Arten und Sorten und die Beziehungen zwischen Habitus und Wasserverbrauch betrifft. Die vorliegende Studie konnte diesbezüglich auch nur erste Einblicke gewähren. Da sie ein so hohes Erklärungspotenzial bieten, sollte diesen Aspekten in Zukunft mehr Aufmerksamkeit geschenkt werden beziehungsweise Studien durchgeführt werden, die sich explizit diesem Thema annehmen. Weil Ausgrabungen oder Freilegungen der Wurzeln jedoch schwierig umzusetzen sind, können innovative, neue Techniken, wie beispielsweise das Bodenradar, vermehrt genutzt werden, sofern sich ihre Anwendungsfreundlichkeit in Zukunft erhöht (siehe Kap. 3.8.5). Eine fundierte und regelmäßig aktualisierte Datenbasis sollte auch die Grundlage bilden für Modelle, welche die Formentfaltung, das Wachstum und die Ökosystemleistungen von

Stadtbäumen, wie beispielsweise das Stadtklimamodelle *ENVI-met* oder das dreidimensionale Strukturmodell *CityTree*, praxistauglich quantifizieren. Dadurch können Vergleiche zwischen Ist- und Planzustand, Vergangenheit und Zukunft gezogen werden.

Das mögliche Potenzial, mit Sorten den Zielkonflikt zwischen Trockenheitstoleranz und Kühlleistung zu überwinden, sollte intensiv weiter untersucht werden. Inwieweit die Pflanzenzüchtung gezielt *Allrounder*, wie die Brabanter Silber-Linde, hervorbringen kann und nach welchen Kriterien sie diese in Zukunft ausrichten könnte, sind zukunftsweisende Forschungsfragen. Dazu gehört auch der Aspekt, welche Kopplungseffekte sich durch die Wahl artfremder Wurzelunterlagen ergeben.

Auch der Einfluss von Boden- beziehungsweise Substrateigenschaften und Düngestrategien auf die Ausbildung der Wurzeln und der Wurzel-Spross-Verhältnisse sollte untersucht werden. Der Pflanz- und Düngetechnik kommt somit eine entscheidende Rolle zu.

Mindestens genauso wichtig ist es allerdings auch, die bereits bestehenden Ergebnisse aus experimentellen Studien zu systematisieren und zu bündeln, um solide Klassifizierungen und Typologien von Bäumen herauszuarbeiten, die über die Art-Ebene hinausgehen. Sinnvolle Kategorien könnten sein die Holzanatomie (Bush et al., 2008; Peters et al., 2010; Pataki et al., 2011; Klein, 2014; Rahman et al., 2018; 2020), der Pflanzenfunktionstyp (z.B. sommergrüne Laubbäume vs. immergrüne Nadelbäume; Peters et al., 2010) oder der Lebensbereich (LB) (Rahman et al., 2020), wie auch in dieser Dissertation untersucht. Dabei sollten in künftigen Studien auch die Eigenschaften von Gehölzen aus den Lebensbereichen Auen- und Ufergehölze (LB 2; z.B. *Fraxinus excelsior* und *Platanus x hispanica*) und aus kühlfeuchten Wäldern (LB 7; z.B. *Acer pseudoplatanus* und *Aesculus hippocastanum*) genauer untersucht werden, denn auch sie werden häufig gepflanzt (Kap. 3.3).

### *Empfehlungen für die Praxis*

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird deutlich, dass die Diskussion um die Pflanzung alternativer, trockenheitstoleranter und zum Teil nichtheimischer Baumarten und Sorten als Ersatz für heimische Baumarten und Sorten nicht einseitig geführt werden sollte. Die vorliegende Studie möchte vielmehr einen Beitrag dazu leisten, dass

für unterschiedliche Wuchssituationen in Städten die richtige Pflanzenauswahl getroffen und gleichzeitig das Kühlpotenzial bestmöglich genutzt werden kann. Die Daten können als Entscheidungsgrundlage für eine klimaangepasste Stadtentwicklung genutzt werden.

Heimische Arten und Sorten aus frischen Waldhabitaten besitzen ein hohes Kühlpotenzial. Sie sollten jedoch aufgrund ihrer geringeren Trockenheitstoleranz nur an naturnahen Standorten, wie Parkanlagen, oder Standorten mit ausreichend Wurzelraum und gutem Substrat gepflanzt werden. Die höchsten Kühlleistungen erbringen hier dicht belaubte Arten und Sorten, deren Kronendimensionen möglichst groß gehalten werden sollten, denn das Ausmaß und die Dichte des Bewuchses haben sich als bedeutende Einflussgrößen für die Kühlleistung herausgestellt. Arten und Sorten mit einer hohen Trockenheitstoleranz und einem intensiven, das Substrat explorierenden Wurzelsystems sind für prekäre Wuchsorte mit einem limitiertem Wurzelraum und einem hohen Versiegelungsgrad, wie dem Straßenraum, auszuwählen. In dieser spezifischen Wuchssituation, wo langsam wachsende Arten und Sorten häufig auch aus platztechnischen Gründen vorzuziehen sind, können sie einen langfristigen und konstanten Beitrag für das Stadtklima leisten.

Neben der Wahl geeigneter Arten und Sorten sollten jedoch parallel auch die Wuchsstandorte soweit wie möglich optimiert werden. Neue Ansätze, wie etwa ein Regenwassermanagement, bei dem den Bäumen Wasser gezielt zugeleitet wird, um deren Kühlleistung zu erhöhen und die Vitalität zu steigern, und die Entsiegelung sind vielversprechende Ansätze. Besonderer Wert sollte auch auf einen ausreichenden Wurzelraum gelegt werden. Darüber hinaus sind Substrate mit hoher Wasserspeicherkapazität zu entwickeln und auszuwählen. Trockenheitsanfällige Arten und Sorten, wie die Amerikanische Stadt-Linde, könnten von verbesserten Pflanztechniken und Standortbedingungen profitieren und das Stadtklima effektiv regulieren.

Im Allgemeinen sollte sich der innerstädtische Baumbestand durch eine hohe Arten- beziehungsweise Sortenvielfalt mit einem hohen Anteil trockenheitstoleranter Arten und

Sorten auszeichnen. Eine intra- und interspezifische Variabilität wird im Bereich der Forstwissenschaft (Waldumbau in artenreiche Mischwälder) und im Bereich der Städte zunehmend gefordert. Die Bewahrung beziehungsweise eine strategische Erhöhung der genetischen Vielfalt ist nicht nur sinnvoll unter dem Aspekt der mikroklimatischen Regulationsleistungen, sondern auch für die Widerstandsfähigkeit der innerstädtischen Baumbestände gegenüber Schädlingen, Krankheiten und weiteren abiotischen Stressfaktoren. Unter diesem Aspekt wird es als höchst sinnvoll erachtet, Arten und Sorten mit einer erhöhten Trockenheitstoleranz zu pflanzen, denn mit dem Trockenstress potenziert sich auch die Anfälligkeit gegenüber biologischen Schädlingen, wie Insekten und Pathogenen (McDowell et al., 2008). Für eine Bewahrung oder gar eine Erhöhung des innerstädtischen Genpools im Pflanzenbestand können die Artenvielfalt des hochdiversifizierten Europas oder auch außerhalb Europas liegende Erdregionen dienen (Sjöman et al., 2012). Da nur gesunde Vegetation optimale Leistungen erbringen kann und heimische Baumarten und Sorten, wie allen voran die Amerikanische Stadt-Linde, nachweislich schlecht mit Trockenheit zurechtkommen, kann nur begrüßt werden, dass Arten und Sorten mit einer hohen Anpassungsfähigkeit und einer hohen Toleranz gegenüber unterschiedlichen Stressfaktoren für künftige Pflanzungen vorgesehen werden. Diese Entscheidung ist sinnvoll, trotz der Tatsache, dass sich ihre Anpassungen an Trockenheit zu Lasten der Kühlleistung auswirken können.

Die Ergebnisse dieser Dissertation konnten bestätigen, dass mittels der Herkunft eines Gehölzes eine gute Einschätzung über seine Trockenheitstoleranz getroffen werden kann. Darüber hinaus wurde die Systematik der Lebensbereiche jedoch auch als relevantes Werkzeug für die Bewertung der Kühlpotenziale von Gehölzen identifiziert. Ob dies auch in größerem Umfang für alle weitere Lebensbereiche (Kiermeier, 1992) gilt und welche Anpassungen der Systematik durch die Nutzung von Sorten gegebenenfalls erfolgen müssen, sollte auf unterschiedlichen Ebenen weiter erforscht werden. Die Etablierung einer stimmigen Gesamtsystematik könnte die Entscheidungen bezüglich der Baumarten- und Sortenwahl deutlich optimieren und um einen Leistungsaspekt erweitern. Ferner ließe eine umfassende Systematik zuverlässige Projektionen des

Kühlpotenzials von Stadtbäumen bei unterschiedlichen Wuchsbedingungen für die Stadtplanung, die Landschaftsarchitektur und das urbane Wassermanagement zu.

## Literaturverzeichnis

- ArcGIS (2014) (Version 10.2.1) [Computersoftware]. Redlands, USA: Esri.
- Armson, D.; Rahman, M.A., Ennos, A.R. (2013a). A comparison of the shading effectiveness of five different street tree species in Manchester, UK. *Arboriculture & Urban Forestry* 39(4), 157-164.
- Armson, D.; Stringer, P.; Ennos, A.R. (2013b). The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban Forestry & Urban Greening* 12(3), 282-286. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.04.001>.
- Armson, D.; Stringer, P.; Ennos, A.R. (2012). The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban Forestry & Urban Greening* 11(3), 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.05.002>.
- Bartels, H. (1993). *Gehölkunde: Einführung in die Dendrologie*. Stuttgart: Ulmer.
- Basler, D.; Körner, C. (2014). Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* 165, 73-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.001>.
- Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) (2019). Stadtgrün 2021: Neue Bäume braucht das Land! URL: [https://www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes\\_gruen/085113/index.php](https://www.lwg.bayern.de/landespflege/urbanes_gruen/085113/index.php). Zugriff: 28 August 2019.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) (2015). *Klima-Report Bayern 2015. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten*. München.
- Bettez, N.; Groffmann, P. (2013). Nitrogen deposition in and near an urban ecosystem. *Environmental Science & Technology* 47(11), 6047-6051. <https://doi.org/10.1021/es400664b>.
- Böll, S. (2017). Das Forschungsprojekt "Stadtgrün 2021" - ein Überblick. In: D. Dujesiefken (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2017*. Braunschweig: Haymarket Media, 23-28.
- Böll, S.; Albrecht, R.; Mahsberg, D. (2019). Stadtklimabäume – geeignete Habitate für die urbane Insektenvielfalt? *LWG aktuell / 2019*, 3-11.
- Bréda, N. (2003). Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* 54(392), 2403-2417. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg263>.
- Bréda, N.; Granier, A. (1996). Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). *Annales des Sciences Forestières* 53(2-3), 521-536. <https://doi.org/10.1051/forest:19960232>.

- Brown, R.; Gillespie, T. (1995). Microclimatic landscape design: creating thermal comfort and energy efficiency. New York: Wiley.
- Buchholz, S.; Kossmann, M.; Roos, M. (2016). INKAS – a guidance tool to assess the impact of adaptation measures against urban heat. *Meteorologische Zeitschrift* 25(3), 281-289. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0731>.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2016). Wohnungsbau in Deutschland: Baugenehmigungszahlen 2015. *INFORMATIONEN aus der Forschung des BSSR* 3, 7.
- Bush, S.E.; Pataki, D.E.; Hultine, K.R.; West, A.G.; Sperry, J.S.; Ehleringer, J.S. (2008). Wood anatomy constrains stomatal responses to atmospheric vapor pressure deficit in irrigated, urban trees. *Oecologia* 156(1), 13-20. <https://doi.org/10.1007/s00442-008-0966-5>.
- Butnor, J.R.; Doolittle, J.A.; Kress, L.; Cohen, S.; Johnsen, K.H. (2001). Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States. *Tree Physiology* 21(17), 1269-1278. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269>.
- Čermák, J.; Kučera, J.; Nadezhdina, N. (2004). Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 18(5), 529-546. <https://doi.org/10.1007/s00468-004-0339-6>.
- Čermák, J.; Hruška, J.; Martinková, M.; Prax, A. (2000). Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. *Plant and Soil* 219(1-2), 103-116. <https://doi.org/10.1023/A:1004736310417>.
- Chianucci, F.; Puletti, N.; Giacomello, E.; Cutini, A.; Corona, P. (2015). Estimation of leaf area index in isolated trees with digital photography and its application to urban forestry. *Urban Forestry & Urban Greening* 14(2), 377-382. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.001>.
- Chiesura, A. (2004). The role of urban parks for the sustainable city. *Landscape and Urban Planning* 68(1), 129-138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2003.08.003>.
- Godet, J.-D. (2011). Baumrinden: Vergleich und bestimmen. Stuttgart: Ulmer.
- Chmielewski, F.-M.; Rötzer, T. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 108(2), 101-112. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(01\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(01)00233-7).
- Choat, B.; Jansen, S.; Brodribb, T.J.; Cochard, H.; Delzon, S.; Bhaskar, R.; Bucci, S.J.; Field, T.S.; Gleason, S.M.; Hacke, U.G.; Jacobsen, A.L.; Lens, F.; Maherali, H.; Martínez-Vilalta, J.; Mayr, S.; Mencuccini, M.; Mitchell, P.; Nardini, A.; Pittermann, J.; Pratt, R.B.; Sperry, J.S.; Westoby, M.; Wright, I.J.; Zanne, A.E. (2012). Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* 491, 752-755. <https://doi.org/10.1038/nature11688>.

- Cinnirella, S.; Magnani, F.; Saracino, A.; Borghetti, M. (2002). Response of a mature *Pinus laricio* plantation to a three-year restriction of water supply: structural and functional acclimation to drought. *Tree Physiology* 22(1), 21-30. <https://doi.org/10.1093/treephys/22.1.21>.
- Davies, Z.G.; Edmondson, J.L.; Heinemeyer, A.; Leake, J.R.; Gaston, K.J. (2011). Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale. *Journal of Applied Ecology* 48(5), 1125-1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02021.x>.
- Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) (2019). Straßenbaumliste. URL: <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenubersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste>. Zugriff: 28 August 2019.
- Deutscher Wetterdienst (2019a). CDC (Climate Data Center). URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html). Zugriff: 09.10.2019.
- Deutscher Wetterdienst (2019b). Klimaprojektionen für Deutschland. URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer\\_deutschland/fuer\\_dtld\\_homenode.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_homenode.html). Zugriff: 05.09.2019.
- Deutscher Wetterdienst (2019c). Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. URL: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt\\_waermeinseln/projekt\\_waermeinseln\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html). Zugriff: 16 August 2019.
- Deutscher Wetterdienst (2017). Deutschlandwetter im Jahr 2017. URL: [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2017/20171229\\_deutschlandwetter\\_jahr2017\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2017/20171229_deutschlandwetter_jahr2017_news.html). Zugriff: 11 Oktober 2019.
- Deutscher Wetterdienst 2016. Deutschlandwetter im Jahr 2016. URL: [https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2016/20161229\\_deutschlandwetter\\_jahr2016\\_news.html](https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2016/20161229_deutschlandwetter_jahr2016_news.html). Zugriff: 11 Oktober 2019.
- Dreßler, A.; Korn, S.; Scheewe, P.; Roloff, A. (2017). Projekt AdapTree – Anzucht von Stadtbäumen bei unterschiedlichem Bewässerungsmanagement. In: D. Dujesiefken (Hrsg): *Jahrbuch der Baumpflege 2017*. Braunschweig: Haymarket Media, 192-205.
- Duhme, F.; Pauleit, S. (2000). The dendrofloristic richness of SE-Europe, a phenomenal treasure for urban plantings. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem* 370, 23-29.
- Ewers, B.; Oren, R.; Johnsen, K.; Landsberg, J. (2001). Estimating maximum mean canopy stomatal conductance for use in models. *Canadian Journal of Forest Research* 31(2), 198-207; <https://doi.org/10.1139/x00-159>.

- Fini, A.; Ferrini, F.; Frangi, P.; Amoroso, G.; Piatti, R. (2009). Withholding irrigation during the establishment phase affected growth and physiology of Norway maple (*Acer platanoides*) and linden (*Tilia* spp.). *Arboriculture & Urban Forestry* 35, 241-251.
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau (FLL) (2010). Empfehlungen für Baumpflanzungen – Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Bonn.
- Gebauer, T.; Horna, V.; Leuschner, C. (2008). Variability in radial sap flux density patterns and sapwood area among seven co-occurring temperate broad-leaved tree species. *Tree Physiology* 28(12), 1821-1830. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.12.1821>.
- George, K.; Ziska, L.; Bunce, J. A.; Quebedeaux, B. (2007). Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature across an urban-rural transect. *Atmospheric Environment* 41(35), 7654-7665. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.018>.
- Gillner, S.; Korn, S.; Hofmann, M.; Roloff, A. (2017). Contrasting strategies for tree species to cope with heat and dry conditions at urban sites. *Urban Ecosystems* 20(4), 853-865. <https://doi-org.eaccess.ub.tum.de/10.1007/s11252-016-0636-z>.
- Gillner, S.; Korn, S.; Roloff, A. (2015a). Leaf-gas exchange of five tree species at urban street sites. *Arboriculture & Urban Forestry* 41(3), 113-124.
- Gillner, S.; Vogt, J.; Tharang, A.; Dettmann, S.; Roloff, A. (2015b). Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning* 143(2015), 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.06.005>.
- Godet, J.-D. (2011). Baumrinden: Vergleich und bestimmen. Stuttgart: Ulmer.
- Gómez-Muñoz, V.; Porta-Gándara, M.; Fernández, J. (2010). Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landscape and Urban Planning* 94(3-4), 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.09.002>.
- Goss, M.; Ehlers, W. (2009). The role of lysimeters in the development of our understanding of soil water and nutrient dynamics in ecosystems. *Soil Use and Management* 25(3), 213-223. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00230.x>.
- Granier, A. (1985). A new method of sap flux measurement in tree stems. *Annales des Sciences Forestières* 42, 193-200.
- Gregg, J.; Jones, C.; Dawson, T. (2003). Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature* 424(2003), 183-187. <https://doi.org/10.1038/nature01728>.
- Grime, J. (2001). Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties. Chichester: Wiley.

- Gunnarsson, A.; Öhrström, E. (2007). Noise and well-being in urban residential environments: the potential role of perceived availability to nearby green areas. *Landscape and Urban Planning* 83(2-3), 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.003>.
- Hack, H.; Bleiholder, H.; Buhr, L.; Meier, U.; Schnock-Fricke, U.; Weber, E.; Witzemberger, A. (1992). Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. -Erweiterte BBCH-Skala, Allgemein-. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* 44(12), 265-270.
- Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (2019). Dürremonitor Deutschland. URL: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>. Zugriff: 22 Januar 2019.
- Hiemstra, J.(2011). Straatboomen. URL: <https://www.straatbomen.nl>. Zugriff: 28 August 2019.
- Hirano, Y.; Dannoura, M.; Aono, K.; Igarashi, T.; Ishii, M.; Yamase, K.; Makita, N.; Kanazawa, Y. (2009). Limiting factors in the detection of tree roots using ground-penetrating radar. *Plant and Soil* 319(15), 15-24. <https://doi-org.eaccess.ub.tum.de/10.1007/s11104-008-9845-4>.
- Holste, E.; Jerke, M.; Matzner, S. (2006). Long-term acclimatization of hydraulic properties, xylem conduit size, wall strength and cavitation resistance in *Phaseolus vulgaris* in response to different environmental effects. *Plant, Cell & Environment* 29(5), 836-843. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01454.x>.
- Hotaling, N.; Bharti, K.; Kriel, H.; Simon, C. J. (2015). DiameterJ: a validated open source nanofiber diameter. *Biomaterials* 61, 327-338. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.05.015>.
- Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Berlin-Brandenburg (INKA BB) (2019). Klimawandel und Innovation. URL: <http://www.inka-bb.de>. Zugriff: 28 August 2019.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, New York: Cambridge University Press.
- Jiao, M.; Zhou, W.; Zheng, Z.; Wang, J.; Qian, Y. (2017). Patch size of trees affects its cooling effectiveness: a perspective from shading and transpiration processes. *Agricultural and Forest Meteorology* 247, 293-299. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.013>.
- Jim, C.Y.; Chen, W.Y. (2008). Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management* 88(4), 665-676. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.035>.

- Jonckheere, I.; Fleck, S.; Nackaerts, K.; Muys, B.; Coppin, P.; Weiss, M.; Baret, F. (2004). Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121(2004), 19-35. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.08.027>.
- Kerl, M.; Runge, N.; Tauchmann, H.; Goldscheider, N. (2012). Hydrogeologisches Konzeptmodell von München: Grundlage für die thermische Grundwassernutzung. *Grundwasser* 17(3), 127-135. <https://doi.org/10.1007/s00767-012-0199-8>.
- Kiermeier, P., 1992. Die Lebensbereiche der Gehölze eingeteilt nach dem Kennziffersystem. Pinneberg: Bund deutscher Baumschulen.
- Klein, T. (2014). The variability of stomatal sensitivity to leaf water potential across tree species indicates a continuum between isohydric and anisohydric behaviours. *Functional Ecology* 28, 1313-1320. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12289>.
- Köcher, P.; Horna, V.; Leuschner, C. (2013). Stem water storage in five coexisting temperate broad-leaved tree species: significance, temporal dynamics and dependence on tree functional traits. *Tree Physiology* 33(8), 818-832. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpt055>.
- Kölling, C. (2007). Klimahüllen für 27 Waldbaumarten. *AFZ-DerWald* 23, 1242-1245.
- Konarska, J.; Uddling, J.; Holmer, B.; Lutz, M.; Lindberg, F.; Pleijel, H.; Thorsson, S. (2016). Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *International Journal of Biometeorology* 60(1), 159-172. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1014-x>.
- Kriebel, H. (1957). Patterns of genetic variation in Sugar maple. Wooster: Ohio Agricultural Experiment Station.
- Kunz, J.; Räder, A.; Bauhus, J. (2016). Effects of drought and rewetting on growth and gas exchange of minor European broadleaved tree species. *Forests* 7(10), 239. <https://doi.org/10.3390/f7100239>.
- Kurn, D.M.; Bretz, S.E.; Huang, B.; Akbari, H. (1994). The potential for reducing urban air temperatures and energy consumption through vegetative cooling. <https://doi.org/10.2172/10180633>.
- Laforteza, 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(2), 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.02.003>.
- Landeshauptstadt München (2019a). Standortkundliche Bodenkarte. Bodenkarte für den Großraum München. URL: <http://maps.muenchen.de/rgu/bodenkarte>. Zugriff: 10.10.2019.
- Landeshauptstadt München (2019b). Perspektiven mit neuen Baumarten im städtischen Bereich. Kellerseminar am 14.03.2019 des Baureferats der Landeshauptstadt München.

- Landeshauptstadt München (2018). München in Zahlen. URL:  
<https://www.muenchen.de/sehenswuerdigkeiten/muenchen-in-zahlen.html>. Zugriff: 20 Januar 2020.
- Landeshauptstadt München (2016a). Konzept zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels in der Landeshauptstadt München. München, Augsburg, Berlin: Landeshauptstadt München, Referat für Gesundheit und Umwelt.
- Landeshauptstadt München (2016b). Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten (ZTV-Vegtra-Mü). München: Landeshauptstadt München, Baureferat, Gartenbau.
- Larcher, W. (2001). Ökophysiologie der Pflanzen. Stuttgart: UTB.
- Lechowicz, M.J. (1984). Why do temperate deciduous trees leaf out at different times? Adaptation and ecology of forest communities. *The American Naturalist* 124(6), 821-842.  
<https://doi.org/doi/10.1086/284319>.
- LI-COR, 2012. LAI-2200 Plant Canopy Analyzer. URL:  
<https://www.licor.com/documents/6n3conpja6uj9aq1ruyn>. Zugriff: 9 September 2019.
- Liu, J.-C; Payer, H.-D. (1995). Zur Messung des von Witterungseinflüssen bereinigten, zeitlich hochauflösenden Dickenzuwachses bei Bäumen. In: Methoden der Permanent-Zuwachsmessung. Forstliche Forschungsberichte München. 40-44.
- Lloret, F.; Keeling, E.; Sala, A. (2011). Components of tree resilience: Effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos* 120(12), 1909-1920.  
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>.
- Lösch, R. (2001). Wasserhaushalt der Pflanzen. Wiebelsheim: Quelle & Meyer.
- Lucon; O.; Ürge-Vorsatz; D.; Ahmed, Zain; A.; Akbari; H.; Bertoldi; P.; Cabeza; L.F.; Eyre; N.; Gadgil; A.; Harvey; L.D.D.; Jiang; Y.; Liphoto; E.; Mirasgedis; S.; Murakami; S.; Parikh; J.; Pyke; C.; Vilariño; M.V. (2014). Buildings. In: Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Matyssek, R.; Herppich, W. (2017). Experimentelle Pflanzenökologie: Wasserfernttransport in der Pflanze – Grundlagen und Messverfahren. In: *Springer Reference Naturwissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1-28. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53493-9\\_15-1](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53493-9_15-1).
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). Ecosystems and human well-being: synthesis, Washington D.C.: Island Press.

- McCarthy, H.; Pataki, D.; Jenerette, G. (2011). Plant water-use efficiency as a metric of urban ecosystem services. *Ecological Applications* 21(8), 3115-3127. <https://doi.org/10.1890/11-0048.1>.
- McDowell, N.; Pockman, W.T.; Allen, C.D.; Breshears, D.D.; Cobb, N.; Kolb, T.; Plaut, J.; Sperry, J.; West, A.; Williams, D.G.; Yezpez, E.A. (2008). Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? *New Phytologist* 178(4), 719-739. [10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02436.x).
- Mokany, K.; Raison, R.; Prokushkin, A. (2006). Critical analysis of root:shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* 12(1), 84-96. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>.
- Moser, A.; Rahman, M.A.; Pretzsch, H.; Pauleit, S.; Rötzer, T. (2017). Inter- and intraannual growth patterns of urban small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) at two public squares with contrasting microclimatic conditions. *International Journal of Biometeorology* 61(2017), 1095-1107. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1290-0>.
- Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. (2015). Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening* 14(4), 1110-1121. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.10.005>.
- Moser-Reischl, A.; Rahman, M. A.; Pretzsch, H.; Pauleit, S.; Rötzer, T. (2019). Growth patterns and climate relationships of two contrasting urban tree species. *Landscape and Urban Planning* 183, 88-99.
- Munné-Bosch, S.; Alegre, L. (2004). Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. *Functional Plant Biology* 31(3), 203-216. <https://doi.org/10.1071/FP03236>.
- Nadezhdina, N.; Vandegehuchte, M.; Steppe, K. (2012). Sap flux density measurements based on the heat field deformation method. *Trees* 26, 1439-1448. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0718-3>.
- Niinemets, Ü.; Valladares, F. (2006). Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs* 76(4), 521-547. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0521:TTSDAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2).
- Nowak, D.; Greenfield, E.; Hoehn, R.; Lagpoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution* 178, 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.019>.

- Nowak, D.; Crane, D.; Stevens, J. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4(3-4), 115-123.  
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>.
- Nowak, D., 1996. Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees. *Forest Science* 42(4), 504-507. <https://doi.org/10.1093/forestscience/42.4.504>.
- Oke, T. (2011). Urban heat islands. In: *The Routledge Handbook of Urban Ecology*. London, New York: Routledge, 120-131.
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 455, 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- Oren, R.; Phillips, P.; Katul, G.; Ewers, B.E.; Pataki, D.E. (1998). Scaling xylem sap flux and soil water balance and calculating variance: a method for partitioning water flux in forests. *Annales des Sciences Forestières*, 55(1-2), 196-216. <https://doi.org/10.1051/forest:19980112>.
- Pataki, D.; McCarthy, H.; Litvak, E.; Pincetl, S. (2011). Transpiration of urban forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications* 21(3), 661-677.  
<https://doi.org/10.1890/09-1717.1>.
- Pauleit, S.; Hansen, R.; Rall, E.L.; Zölch, T.; Andersson, E.; Luz, A.; Santos, A.; Szaraz, L.; Tosics, I.; Vierikko, K. (2017). Urban landscapes and green infrastructure. In: H. Shugart (Hrsg.): *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press.  
<https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.23>.
- Pauleit, S.; Jones, N.; Garcia-Martin, G.; Garcia-Valdecantos, J.L.; Rivière, L.M.; Vidal-Beaudet, L.; Bodsong, M.; Randrup, T.B. (2002). Tree establishment practice in towns and cities – Results from a European survey. *Urban Forestry & Urban Greening* 1(2), 83-96.  
<https://doi.org/10.1078/1618-8667-00009>.
- Peper, P.; McPherson, E. (2003). Evaluation of four methods for estimating leaf area of isolated trees. *Urban Forestry & Urban Greening* 2(1), 19-29. <https://doi.org/10.1078/1618-8667-00020>.
- Peters, E.; McFadden, J.; Montgomery, R. (2010). Biological and environmental controls on tree transpiration in a suburban landscape. *Journal of Geophysical Research* 115(G4), 1-13.  
<https://doi.org/10.1029/2009JG001266>.
- Pfadenhauer, J.; Klötzli, F. (2014). *Vegetation der Erde. Grundlagen, Ökologie, Verbreitung*. Berlin; Heidelberg: Springer.
- Pfoser, N.; Jenner, N.; Henrich, J.; Heusinger, J.; Weber, S. (2014). Gebäude, Begrünung und Energie: Potentiale und Wechselwirkungen. Interdisziplinärer Leitfaden als Planungshilfe zur Nutzung energetischer, klimatischer und gestalterischer Potentiale sowie zu den Wechselwirkungen von Gebäude, Bauwerksbegrünung und Gebäude. In:

Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (Hrsg.): *FLL-Schriftenreihe "Forschungsvorhaben"*, FV 2014/01. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

- Polgar, C.; Gallinat, A.; Primack, R. (2014). Drivers of leaf-out phenology and their implications for species invasions: insights from Thoreau's Concord. *New Phytologist* 202(1), 106-115. <https://doi-org.eaccess.ub.tum.de/10.1111/nph.12647>.
- Potschin, M.; Haines-Young, R. (2016). Defining and measuring ecosystem services. In: M. Potschin, R. Haines-Young, R. Fish & R.K. Turner (Hrsg.): *Routledge Handbook of Ecosystem Services*. London, New York: Routledge, 25-44.
- Prado-Junior, J.A.; Schiavini, I.; Vale, V.S.; Arantes, C.S.; van der Sande, M.T.; Lohbeck, M.; Poorter, L. (2016). Conservative species drive biomass productivity in tropical dry forests. *Journal of Ecology* 104(3), 817-827. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12543>.
- Pretzsch, H.; Biber, P.; Uhl, E.; Dahlhausen, J.; Schütze, G.; Perkins, D.; Rötzer, T.; Caldentey, J.; Koike, T.; van Con, T.; Chavanne, A.; du Toit, B.; Foster, K.; Lefer, B. (2017). Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Scientific Reports* 7(2017), 15403. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14831-w>.
- Rahman, M.A.; Hartmann, C.; Paeth, H.; Pretzsch, H.; Pauleit, S.; Rötzer, T. (in Vorbereitung). Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites.
- Rahman, M.A.; Stratópoulos, L.M.F.; Moser-Reischl, A.; Zölch, T.; Häberle, K.-H.; Rötzer, T.; Pretzsch, H.; Pauleit, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis. *Building and Environment* 170(2020), 106606. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>.
- Rahman, M.A.; Moser, A.; Anderson, M.; Zhang, C.; Rötzer, T.; Pauleit, S. (2019). Comparing the infiltration potentials of soils beneath the canopies of two contrasting urban tree species. *Urban Forestry & Urban Greening* 38(2019), 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.11.002>.
- Rahman, M.A.; Moser, A.; Gold, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S. (2018). Vertical air temperature gradients under the shade of two contrasting urban tree species during different types of summer days. *Science of the Total Environment* 633(2018), 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.168>.
- Rahman, M.A.; Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S. (2017a). Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 232, 443-456. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.10.006>.

- Rahman, M.A.; Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S. (2017b). Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment* 114(2017), 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.013>.
- Rahman, M.A.; Armson, D.; Ennos, A.R. (2015). A comparison of the growth and cooling effectiveness of five commonly planted urban tree species. *Urban Ecosystems* 18(2015), 371-389. <https://doi.org/10.1007/s11252-014-0407-7>.
- R Core Team (2019) (Versionen 3.2.1-3.5.3) [Computersoftware]. The R project for statistical computing. Wien.
- Reichwein, S. (2002). Baumwurzeln unter Verkehrsflächen. Untersuchung zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung. Hannover: Universität Hannover Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur.
- Robine, J.M.; Cheung, S.L.K.; Le Roy, S.; Van Oyen, H.; Herrmann, F.R.; Griffiths, C.; Michel, J.-P.; Herrmann, F.R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus Biologies* 331, 171-178. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2007.12.001>.
- Roloff, A.; Bärtels, A. (2014). Flora der Gehölze: Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung. Stuttgart: Ulmer.
- Roloff, A.; Gillner, S. (2013). Klimawandel und Stadtbaumarten. In: A. Roloff (Hrsg.): *Bäume in der Stadt: Besonderheiten, Funktion, Nutzen, Arten, Risiken*. Stuttgart: Ulmer, 168-186.
- Roloff, A. (2013). Stadt- und Straßenbäume der Zukunft – welche Arten sind geeignet? In: A. Roloff, D. Thiel & H. Weiß (Hrsg.): *Aktuelle Fragen der Stadtbaumplanung, -pflege und -verwendung. Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt Beiheft 14*, 173-187.
- Roloff, A.; Grundmann, S.; Korn, S. (2013). Trockenstress-Toleranz bei Stadtbäumen - Anpassungs- und Schutzstrategien/Arteneignung. In: D. Dujesiefken (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2013*. Braunschweig: Haymarket Media, 173-185.
- Roloff, A.; Rust, S. (2007). Reaktionen von Bäumen auf die Klimaänderung und Konsequenzen für die Verwendung. In: A. Roloff; D. Thiel & H. Weiss (Hrsg.): *Urbane Gehölzverwendung im Klimawandel und aktuelle Fragen der Baumpflege. Forstwissenschaftliche Beiträge Tharandt Beiheft 6*, 16-28.
- Rötzer, T.; Biber, P.; Moser, A.; Schäfer, C.; Pretzsch, H. (2017). Stem and root diameter growth of European beech and Norway spruce under extreme drought. *Forest Ecology and Management* 406, 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.070>.
- Santiago, L.S.; Goldstein, G.; Meinzer, F.C.; Fisher, J.B.; Machado, K.; Woodruff, D.; Jones, T. (2004). Leaf photosynthetic traits scale with hydraulic conductivity and wood density in

- Panamanian forest canopy trees. *Oecologia* 140(4), 543-550. <https://doi-org.eaccess.ub.tum.de/10.1007/s00442-004-1624-1>.
- Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I.; Frise, E.; Kaynig, V.; Longair, M.; Pietzsch, T.; Preibisch, S.; Rueden, C.; Saalfeld, S.; Schmid, B.; Tinevez, J.-Y.; White, D.J.; Hartenstein, V.; Eliceiri, K.; Tomancak, P.; Cardona, A. (2012). Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature Methods* 9(2012), 676-682. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>.
- Schirmer, H.; Buschner, W.; Vappel, A.; Matthäus, H.G.; Schlegel, M. (1987). Meyers kleines Lexikon Meteorologie. Mannheim, Wien, Zürich: Meyers Lexikonverlag.
- Schuster, C.; Estrella, N.; Menzel, A. (2014). Shifting and extension of phenological periods with increasing temperature along elevational transects in southern Bavaria. *Plant Biology* 16(2), 332-344. <https://doi.org/10.1111/plb.12071>.
- Schütt, P.; Weisgerber, H.; Lang, J.; Roloff, A.; Stimm, B. (1994a). Enzyklopädie der Holzgewächse. Handbuch und Atlas der Dendrologie. III-2 Laubbaumarten. Landsberg am Lech: Ecomed.
- Schütt, P.; Weisgerber, H.; Lang, J.; Roloff, A.; Stimm, B. (1994b). Enzyklopädie der Holzgewächse. Handbuch und Atlas der Dendrologie. III-4 Laubbaumarten. Landsberg am Lech: Ecomed.
- Seidel, H.; Matiu, M.; Menzel, A. (2019). Compensatory growth of Scots pine seedlings mitigates impacts of multiple droughts within and across years. *Frontiers in Plant Science* 10, 519. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00519>
- Seidel, H.; Menzel, A. (2016). Above-ground dimensions and acclimation explain variation in drought mortality of Scots pine seedlings from various provenances. *Frontiers in Plant Science* 7, 1014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01014>.
- Shashua-Bar, L.; Hoffman, M. (2000). Vegetation as a climatic component in the design of an urban street: an empirical model for predicting the cooling effect of urban greenareas with trees. *Energy and Buildings* 31(3), 221-235. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(99\)00018-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(99)00018-3).
- Sjöman, H.; Hirons, A.D.; Bassuk, N.L. (2018). Improving confidence in tree species selection for challenging urban sites: a role for leaf turgor loss. *Urban Ecosystems* 21(2018), 1171-1188. <https://doi.org/10.1007/s11252-018-0791-5>.
- Sjöman, H.; Gunnarsson, A.; Pauleit, S.; von Bothmer, R. (2012). Selection approach of urban trees for inner-city environments: learning from nature. *Arboriculture & Urban Forestry* 38(5), 194-204.
- Skelhorn, C.; Levermore, G.; Lindley, S. (2016). Impacts on cooling energy consumption due to the UHI and vegetation changes in Manchester, UK. *Energy and Buildings* 122, 150-159. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.035>.

- Sponagel, H. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Hannover: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Steppe, K.; Sterck, F.; Deslauriers (2015). Diel growth dynamics in tree stems: linking anatomy and ecophysiology. *Trends in Plant Science* 20(6), 335-343.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2015.03.015>.
- Steppe, K.; Lemeur, R. (2004). An experimental system for analysis of the dynamic sap-flow characteristics in young trees: results of a beech tree. *Functional Plant Biology* 31(1), 83-92.  
<https://doi.org/10.1071/FP03150>.
- Stokes, A.; Fourcaud, T.; Hruška, J.; Čermák, J.; Nadyezhdina, N.; Nadyezhdin, V.; Praus, L. (2002). An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. ground-penetrating radar. *Journal of Arboriculture* 28(1), 2-10.
- Stratópoulos, L.M.F.; Zhang, C.; Häberle, K.-H.; Duthweiler, S.; Pauleit, S.; Pretzsch, H.; Rötzer, T. (2019a). Effects of drought on the phenology, growth, and morphological development of three urban tree species and cultivars. *Sustainability* 11(18), 5117.  
<https://doi.org/10.3390/su11185117>.
- Stratópoulos, L.M.F.; Zhang, C.; Duthweiler, S.; Häberle, K.-H.; Rötzer, T.; Xu, C.; Pauleit, S. (2019b). Tree species from two contrasting habitats for use in harsh urban environments respond differently to extreme drought. *International Journal of Biometeorology* 63(2), 197-208. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1653-9>.
- Stratópoulos, L.M.F.; Duthweiler, S.; Häberle, K.-H.; Pauleit, S. (2018). Effect of native habitat on the cooling ability of six nursery-grown tree species and cultivars for future roadside plantings. *Urban Forestry & Urban Greening* 30(2018), 37-45.  
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.01.011>.
- Taeger, C. (2017). Wurzelqualität ist Baumqualität - Balleneigenschaften und ihre Bedeutung für eine gelungene Pflanzung. In: D. Dujesiefken (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2017*. Braunschweig: Haymarket Media, 74-90.
- Tyree, M.T.; Zimmermann, M.H. (2002). *Xylem structure and the ascent of sap*. New York: Springer.
- Tyree, M.; Salleo, S.; Nardini, A.; Lo Gullo, M.; R., Mosca (1999). Refilling of embolized vessels in young stems of Laurel. Do we need a new paradigm? *Plant Physiology* 120(1), 11-21.  
<https://doi.org/10.1104/pp.120.1.11>.
- Uehre, P., Herrmann, S. (2017). Untersuchungen zur Trocken- und Hitzetoleranz von Bäumen im Klimawandel. In: D. Dujesiefken (Hrsg.): *Jahrbuch der Baumpflege 2017*. Braunschweig: Haymarket Media, 183-191.

- Umwelt-Geräte-Technik (UGT) (2019a). Bedienungsanleitung UMP-1 BT. URL: [https://www.ugt-online.de/fileadmin/Public/downloads/Produkte/Bodenkunde/Bodenfeuchte/UMP-1BT\\_Bedienungsanleitung.pdf](https://www.ugt-online.de/fileadmin/Public/downloads/Produkte/Bodenkunde/Bodenfeuchte/UMP-1BT_Bedienungsanleitung.pdf). Zugriff: 18 September 2019.
- Umwelt-Geräte-Technik (2019b). Xylemflusssensor HFD (HFD8-100 / HFD8-50). URL: <http://www.ugt-online.de/produkte/oekologie/saftfluss-und-wasserpotenzial/xylemflusssensor-hfd/>. Zugriff: 10 Dezember 2019.
- United Nations (UN) (2019). World urbanization prospects: the 2018 revision. New York: UN Department of Economic and Social Affairs.
- United Nations (2018). World urbanization prospects 2018. URL: <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/word>. Zugriff: 16 August 2019.
- Verstraeten, W.; Veroustraete, F.; Feyen, J. (2008). Assessment of evapotranspiration and soil moisture content across different scales of observation. *Sensors* 8(1), 70-117. <https://doi.org/10.3390/s8010070>.
- Vitasse, Y.; Delzon, S.; Bresson, C.C.; Michalet, R.; Kremer, A. (2009). Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone treespecies growing in a common garden. *Canadian Journal of Forest Research* 39(7), 1259-1269. <https://doi.org/10.1139/X09-054>.
- World Meteorological Organization (1983). Commission for climatology and applications of meteorology (CCl): abridged final report of the eighth session. Genf.
- Zhang, C.; Stratópoulos, L.M.F.; Pretzsch, H.; Rötzer, T. (2020). Development of fine root biomass of two contrasting urban tree cultivars in response to drought stress. *Forests* 11(1), 108. <https://doi.org/10.3390/f11010108>.
- Zhang, C.; Stratópoulos, L.M.F.; Pretzsch, H.; Rötzer, T. (2019). How do *Tilia cordata* 'Greenspire' trees cope with drought stress regarding their biomass allocation and ecosystem services? *Forests* 10(8), 676. <https://doi.org/10.3390/f10080676>.
- Zhou, B.; Rybski, D.; Kropp, J. (2013). On the statistics of urban heat island intensity. *Geophysical Research Letters* 40(20), 5486-5491. <https://doi.org/10.1002/2013GL057320>.
- Zohner, C.; Renner, S. (2014). Common garden comparison of the leaf-out phenology of woody species from different native climates, combined with herbarium records, forecasts long-term change. *Ecology Letters* 17(8), 1016-1025. <https://doi.org/10.1111/ele.12308>.
- Zölch, T.; Henze, L.; Keilholz, P.; Pauleit, S. (2017). Regulating urban surface runoff through nature-based solutions – an assessment at the micro-scale. *Environmental Research* 157, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.05.023>.

- Zölch, T.; Maderspacher, J.; Wamsler, C.; Pauleit, S. (2016). Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening* 20, 305-316. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.09.011>.
- Zweifel, R.; Item, H.; Häslér, R. (2001). Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology* 21(12-13), 869-877. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.12-13.869>.
- Zweifel, R.; Item, H.; Häslér, R. (2000). Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees* 15(50), 50-57. <https://doi.org/10.1007/s004680000072>.

# Anhang

## Arten- und Sortensteckbriefe

---

### Spitz-Ahorn

---



*Acer platanoides* L., *Sapindaceae*  
(Seifenbaumgewächse)

**Verbreitung**<sup>4</sup>: Europa (ausgenommen Britische Inseln), Kaukasien; im Unterwallis bis 1.600 m ü. NN  
Lebensbereich: 3.1.3.1. **Bezugsquelle**: Baumschule Mey, Meckenheim, D

**Habitus als Straßenbaum**<sup>5</sup>: Wuchshöhe: 20-30 m  
Krone: 15-22 m; oval bis kugelig, dicht geschlossen

**Blätter**<sup>4</sup>: sommergrün; gegenständig; 12-18 cm breit; 5-lappig; Lappen zugespitzt („Träufelspitzen“); oberseits dunkelgrün kahl glänzend, unterseits heller und entlang der Mittelrippe und den Nerven schütter behaart; Blattstiele 3-20 cm lang mit Milchsaft

**Blüten**<sup>4</sup>: 1-1,2 cm breit; gelblich grün, in vielblütigen, aufrechten, 4-8 cm langen Trugdolden; vor der Blattentfaltung bis Mitte Mai, Bestäubung durch Bienen und Fliegen

**Früchte**<sup>1, 4</sup>: flache, kahle Spaltfrüchte; in hängenden Büscheln; 3-5 cm lang; Fruchtreife und -flug Ende September; reiche Fruktifikation

**Zweige**<sup>2, 3</sup>: Triebe kahl mit kleinen Korkwarzen und Lentizellen; Frühjahrssaft mit hohem Vanillingehalt; Äste schräg aufgerichtet oder steil aufwärts wachsend

**Rinde**<sup>2, 3</sup>: in Jugend glatt, später Entwicklung einer feinen, längsrissigen, festen Netzborke, die nicht abblättert; diese ist mit feinen Leistenmustern überzogen; selten: Riegel-, Vogelaugen-Ahorn und Wurzelmaserungen

**Holz**<sup>2</sup>: Reifholzbaum; zerstreutporig; gleichmäßig dichtes Holz (Darrdichte: 0,59 g cm<sup>-3</sup>), hart und mittelschwer

**Wurzeln**: abweichende Angaben: flach entwickeltes Herz-Senkerwurzelsystem<sup>1</sup> oder kompaktes aber tiefreichendes Herzwurzelsystem<sup>2</sup>; Endomykorrhiza; Wurzelhärchen größer und dichter als bei anderen heimischen Baumarten mit Ausnahme der Esche<sup>2</sup>

**Standortansprüche**<sup>1</sup>: Halbschatten- bis Lichtbaumart mit teilweise pioniercharakter

**Boden**<sup>2, 3</sup>: nährstoffreiche, wasserdurchlässige, mäßig

---

---

trockene bis feuchte, lockere, auch kalkhaltige Böden; hohe Toleranz gegenüber zeitweiliger Trockenheit  
Verwendbarkeit im Straßenraum<sup>5</sup>: sehr frosthart;  
empfindlich gegenüber Bodenverdichtung und Streusalz;  
Honigtauabsonderung

---

**Ästhetischer Wert/Besonderheiten:** frühe und auffällige Blüte; goldgelbe bis tiefrote attraktive Herbstfärbung

---

<sup>1</sup>Bartels (1993, S. 200f.); <sup>2</sup>Schütt et al. (1994a, *Acer platanoides*); <sup>3</sup>Godet (2011, S. 74); <sup>4</sup>Roloff & Bärtels (2014, S. 85f.); <sup>5</sup>GALK (2019)

---

---

## Feld-Ahorn

---



*Acer campestre* L. subsp. *campestre*,  
*Sapindaceae* (Seifenbaumgewächse)

**Verbreitung**<sup>3,4</sup>: Europa, Nordafrika, Türkei, Kaukasien; bis knapp 1.000 m ü. NN

Lebensbereich: 6.1.4.2. **Bezugsquelle**: Baumschule Mey, Meckenheim, D

**Habitus als Straßenbaum**<sup>1,5</sup>: Wuchshöhe: 10-15(20) m; trügwüchsiger Baum oder sparriger, mehrstämmiger Strauch

Krone: 10-15 m; kegel- bis eiförmig, meist unregelmäßig, später mehr rundlich

**Blätter**<sup>4</sup>: sommergrün; gegenständig; 5-10 cm breit; sehr variabel: 3- bis 5-lappig; oberseits stumpfgrün, unterseits graugrün und fein behaart, mit deutlichen Achselbärten; Blattstiele etwa so lang wie die Spreite mit Milchsaft

**Blüten**<sup>4</sup>: grünlich gelb ; in 10- bis 20-blütigen, aufrechten, behaarten Rispen; mit Blattentfaltung im Mai; Bestäubung durch Bienen und Fliegen

**Früchte**<sup>1,4</sup>: flache Spaltfrüchte; 2,5-3 cm lang; Fruchtreife und -flug Ende September/Okttober

**Zweige**<sup>3</sup>: teilweise mit flügelartigen Korkleisten; Triebe fein behaart, später verkahlend; Äste steil aufwärts wachsend

**Rinde**<sup>1,3</sup>: Oberflächenepiderm glatt oder vom zweiten Jahr an mit Korkleisten, die an den Knoten eingeschnürt sind; weiße Längslentizellen; netzrissige bis würfelförmig gefelderte Schuppenborke

**Holz**<sup>1</sup>: Reifholzbaum; zerstreutporig; hart und mittelschwer, rötlich

**Wurzeln**<sup>1</sup>: flach entwickeltes Herz-Senkerwurzelsystem

**Standortansprüche**<sup>1</sup>: Lichtbaumart; wärmebedürftig  
Boden<sup>1,3</sup>: wenig anspruchsvoll hinsichtlich Bodenfeuchtigkeit; bevorzugt nährstoffreiche, wechsellockere bis feuchte, lockere, kalkreiche Böden, gedeiht aber auch auf schweren Auewäldböden  
Verwendbarkeit im Straßenraum<sup>5</sup>: stadtklimafest; kommt gut mit leichter Salzbelastung zurecht

**Ästhetischer Wert/Besonderheiten**: intensiv gelbe bis bronzegelbe oder braune Herbstfärbung

---

<sup>1</sup>Bartels (1993, S. 201ff.); <sup>2</sup>Schütt et al. (1994a, *Acer campestre*); <sup>3</sup>Godet (2011, S. 64); <sup>4</sup>Roloff & Bärtels (2014, S. 71f.); <sup>5</sup>GALK (2019)

---

---

## Säulen-Hainbuche

---



---

### *Carpinus betulus* L. 'Fastigiata', *Betulaceae* (Birkengewächse)

*kursiv geschriebene Angaben beziehen sich auf die reine Art*

---

**Verbreitung**<sup>4</sup>: *Europa, Türkei, Kaukasien, Iran; im Elbrus-Gebirge bis 2.300 m ü. NN*

Lebensbereich: 3.1.6.2. **Bezugsquelle**: Baumschule Mey, Meckenheim, D

---

**Habitus als Straßenbaum**<sup>5</sup>: *Wuchshöhe: 15-20 m; ein- oder mehrstämmiger Baum*

*Krone: 4-6 (10) m; anfangs schmal säulen- bis kegelförmig, später breit eiförmig*

---

**Blätter**<sup>1,4</sup>: *sommergrün; wechselständig; 5-10 cm lang; eiförmig bis elliptisch, zugespitzt; oberseits dunkelgrün; zunächst seidig behaart, unterseits auf den Nerven behaart; Blattstiele 0,6-1,3 cm lang*

---

**Blüten**<sup>1</sup>: *unscheinbar; eingeschlechtliche Kätzchen; mit Laubaubruch April bis Mai; nur windbestäubt*

---

**Früchte**<sup>1</sup>: *zusammengedrückt-eiförmige, stark längsrippige Nüsse; 7-14 cm lang; Fruchtreife ab September des Blühjahres; Fruchtverbreitung von Herbst bis Frühjahr durch den Wind*

---

**Zweige**<sup>3</sup>: *zunächst anliegend behaart, später verkahlend, mit zahlreichen weißen und elliptisch geformten Lentizellen; Äste steil aufwärts wachsend, sich jedoch im Alter mehrheitlich in die Horizontale biegend*

---

**Rinde**<sup>2,3</sup>: *in der Jugend dünn und glatt, im Alter längs verlaufendes Netzmuster (Spannrückigkeit); kaum abblätternd; kann bei ganz alten Bäumen ein wenig aufreißen*

---

**Holz**<sup>2</sup>: *zerstreutporig; aufgrund der recht deutlichen Größenunterschiede zwischen den Gefäßen des Früh- und Spätholzes manchmal aber auch als halb-ringporig bezeichnet; gleichmäßig aufgebautes (Rohdichte: 0,69-0,95 g cm<sup>-3</sup>), hartes und schweres Holz*

---

**Wurzeln**<sup>2</sup>: *in tiefgründigen Böden tiefreichendes Herzwurzelsystem, auf feuchten Substraten konzentrieren sich Wurzeln hingegen auf oberste 30-35 cm, nur wenige dringen tiefer ein; mehrere Formen der Ektomykorrhiza-Symbiose, bevorzugen aber keinen spezifischen Pilzpartner*

---

**Standortansprüche**<sup>1</sup>: *Halbschattenbaumart, auf besten Standorten Schattenbaumart*

*Boden*<sup>1,3</sup>: *nährstoffreiche, frische, tiefgründige, sandige oder steinige Lehm- und Tonböden*

---

*Verwendbarkeit im Straßenraum*<sup>5</sup>: *weniger hitze- und strahlungsempfindlich als die Art; für Kübel geeignet*

---

**Ästhetischer Wert/Besonderheiten**: *gold-gelbe Herbstfärbung; in Jugendphase bleiben Blätter abgestorben und braun gefärbt bis zum nächsten Frühjahr am Baum (> Windschutz)*

---

<sup>1</sup>Bartels (1993, S. 104ff.); <sup>2</sup>Schütt et al. (1994a, *Carpinus betulus*); <sup>3</sup>Godet (2011, S. 100); <sup>4</sup>Roloff & Bärtels (2014, S. 169); <sup>5</sup>GALK (2019)

---

---

## Gewöhnliche Hopfenbuche

---



*Ostrya carpinifolia* Scop., *Betulaceae*  
(Birkengewächse)

Verbreitung<sup>1,2</sup>: West-, Zentrales Mittel- und Südosteuropa, Türkei, Kaukasien, Syrien; in Südalpen bis 1.300 m ü. NN

Lebensbereich: 6.3.3.3. **Bezugsquelle:** Baumschule Mey, Meckenheim, D

**Habitus als Straßenbaum**<sup>3</sup>: Wuchshöhe: 10-15 (20) m; meist kurzstämmig

Krone: 8-12 m; in Jugend kegel- bis eiförmig, später aufgelockert rundlich

**Blätter**<sup>2</sup>: sommergrün; wechselständig; 4-10 cm lang; eiförmig bis elliptisch, zugespitzt; oberseits dunkelgrün und spärlich behaart, unterseits blassgrün und auf den Nerven spärlich behaart; Blattstiele bis 1 cm lang

**Blüten**<sup>2</sup>: Kätzchen bis 7,5 m lang; April bis Mai; nur windbestäubt

**Früchte**<sup>2</sup>: eiförmige Nüsse; 3,5-5 cm lang; an der Spitze mit einem Haarbüschel

**Zweige**<sup>1</sup>: in Jugend behaart; tief am Stamm ansetzend

**Rinde**<sup>1,3</sup>: lange glatt bleibend mit hellen Korkwarzen; im Alter Bildung einer längs- und querrissigen Schuppenborke, die sich in eckigen Platten vom Stamm löst

**Holz:** zerstreutporig

**Wurzeln:** --

**Standortansprüche**<sup>3</sup>: Sonne bis Halbschatten; anpassungsfähig; wärmeliebend

Boden<sup>1,3</sup>: bevorzugt felsige, flach- oder auch tiefgründige, frische bis trockene, meist kalkreiche, mäßig nährstoffreiche Böden; toleriert auch sehr trockene und nährstoffarme Böden

Klima<sup>1</sup>: warme Sommer, milde Winter, niederschlagsreich

Verwendbarkeit im Straßenraum<sup>3</sup>: frosthart, stadtklimafest

**Ästhetischer Wert/Besonderheiten:** dekorative hopfenähnliche Früchte; hellgelbe Herbstfärbung

---

<sup>1</sup>Godet (2011, S. 174); <sup>2</sup>Roloff & Bärtels (2014, S. 461); <sup>3</sup>GALK (2019)

---

---

## Amerikanische Stadt-Linde

---



*Tilia cordata* Mill. 'Greenspire', *Malvaceae*  
(Malvengewächse)

*kursiv geschriebene Angaben beziehen sich auf die reine Art*

Verbreitung<sup>2,4</sup>: *Europa, Kaukasien, Nord-Iran, Westsibirien; in Niederösterreich bis 1550 m ü. NN*  
Lebensbereich: 3.1.3.1. **Bezugsquelle:** Baumschule Ebben, Cuijk (bezogen über Bardoel Boomkwekerij, Groeningen, NL)

**Habitus als Straßenbaum**<sup>5</sup>: Wuchshöhe: 18-20 m  
Krone: 10-20 m; anfangs kompakt kegelförmig, später breit eiförmig; regelmäßige und dichte Krone

**Blätter**<sup>4</sup>: sommergrün; wechselständig; 3-10 cm lang; herzförmig bis nahezu rundlich, plötzlich zugespitzt; oberseits grün, kahl; unterseits graugrün mit rostfarbenen Achselbärten entlang der Mittelrippe; Blattstiele 1,5-3 cm lang

**Blüten**<sup>4</sup>: zu 5-7(11) in überhängenden oder nahezu aufrechten, meist oben auf den Blättern liegenden kahlen Trugdolden; Blüte Ende Juni bis Mitte Juli; tagsüber Bestäubung durch Bienen und Fliegen, nachts durch Motten, Windbestäubung ebenfalls möglich

**Früchte**<sup>4</sup>: kugelige, dünnschalige, schwach gerippte und behaarte Nüsse; 5-7 mm dick; Früchte fallen von Anfang Oktober bis Ende März oder auch das ganze Jahr über vom Baum; als Schraubenflieger durch Schwerkraft und Wind verbreitet

**Zweige**<sup>3</sup>: junge Triebe zuerst fein behaart, später verkahlend; Lentizellen klein aber deutlich sichtbar; Hauptäste steil aufrecht wachsend

**Rinde**<sup>2,3</sup>: in Jugend glatt, im Alter Bildung einer Tafelborke entlang der Reihen übereinanderstehender Lentizellen mit längs verlaufenden Furchen und stark erhabenen Leisten; Rindendicke bis 8 mm

**Holz**<sup>2</sup>: Reifholzbaum; zerstreutporig; weich und leicht bis mittelschwer, mittlere Rohdichte: 0,53 g cm<sup>-3</sup>, Darrdichte: 0,32-0,56 g cm<sup>-3</sup>

**Wurzeln**<sup>2</sup>: in Jugend Ausbildung einer kräftigen Pfahlwurzel, später sehr veränderliches, aber nicht ausgedehntes Herzwurzelsystem mit häufigen Wurzelverwachsungen; Ecto- und Endomykorrhiza<sup>2</sup>; hoher Anteil stockbürtiger Feinwurzeln; Wurzeltyp erschließt insgesamt auffallend kleinen Bodenraum, was auf die

---

---

*vergleichsweise geringe mechanische Wurzelenergie  
zurückzuführen ist*

---

**Standortansprüche**<sup>1</sup>: *ausgeprägte Schattenbaumart  
Boden*<sup>2,3</sup>: *bevorzugt lockere, mittel- bis tiefgründige,  
frische bis mäßig trockene, nährstoff- und basenreiche  
Lehm-, Löß- oder Tonböden*

Verwendbarkeit im Straßenraum<sup>5</sup>: *stadtklimafest,  
Honigttauabsonderung*

weitere Hinweise<sup>3</sup>: *salzempfindlich, standorttolerant*

---

**Ästhetischer Wert/Besonderheiten**: *stark duftende  
Blüten; gelbe Herbstfärbung*

---

<sup>1</sup>Bartels (1993, S. 140ff.); <sup>2</sup>Schütt et al. (1994b, *Tilia cordata*); <sup>3</sup>Godet (2011, S. 230); <sup>4</sup>Roloff & Bärtels (2014, S. 689f.); <sup>5</sup>GALK (2019)

---

## Brabanter Silber-Linde

---



*Tilia tomentosa* Moench 'Brabant', *Malvaceae*

*kursiv geschriebene Angaben beziehen sich auf die reine Art*

**Verbreitung**<sup>3</sup>: Südosteuropa, Türkei, Syrien; in Albanien bis 1.300 m ü. NN

Lebensbereich: 6.3.2.1. **Bezugsquelle**: Baumschule Hovest-Engberding, Stadtlohn (bezogen über B+P Boomkwekerij, Opheusden, NL)

**Habitus als Straßenbaum**<sup>4</sup>: Wuchshöhe: 20-25(30) m; relativ raschwüchsig  
Krone: 12-18(20) m; breite kegelförmige dichte und regelmäßig aufgebaute Krone

**Blätter**<sup>3</sup>: sommergrün; wechselständig; 10-15 cm lang; schief-herzförmig bis rundlich, plötzlich zugespitzt; oberseits dunkelgrün, verkahlend; unterseits silbergrau, sternhaarig; Blattstiele 2-3,5 cm lang, fein filzig

**Blüten**<sup>3</sup>: zu 5-10 in hängenden, sternhaarigen, 3-5 cm breiten Zymen; Blühzeit: Juli bis August

**Früchte**<sup>3</sup>: kugelig-eiförmige bis eiförmige, deutlich zugespitzte und gerippte, dickschalige, warzig-filzige Nüsse; 8 mm lang; Fruchtreife: September

**Zweige**<sup>3</sup>: junge Triebe mit dichtstehenden Sternhaaren besetzt, später verkahlend; straff aufrecht

**Rinde**<sup>2</sup>: bleibt lange Zeit glatt, später entstehen senkrechte Risse

**Holz**<sup>2</sup>: zerstreutporig; leicht und sehr weich, Rohdichte: 0,32-0,56 g cm<sup>-3</sup>

**Wurzeln**<sup>2</sup>: junge Silber-L. bilden Pfahlwurzelsystem aus, später entstehen kräftige, oft nahe der Bodenoberfläche verlaufende Seitenwurzeln, die aber keine Senkerwurzeln entwickeln

**Standortansprüche:**

Boden<sup>2</sup>: kalkliebend (pH-Bereich 5,8-8,2), vorwiegend auf Löß, auf Sanden und basischen Gesteinen; optimal sind tiefgründige, frische Substrate

Klima<sup>2</sup>: Niederschlagssummen im natürlichen Areal 500-600 mm; thermophile Art; hohe Toleranz gegenüber niedriger Luftfeuchtigkeit und Bodenfeuchtigkeit

Verwendbarkeit im Straßenraum<sup>4</sup>: bessere Leittrieb Bildung als die Art; keine Honigttauabsonderung

**Ästhetischer Wert/Besonderheiten**<sup>1</sup>: stark duftende Blüten; blüht als letzte der in Deutschland angepflanzten Lindenarten und lockt damit als nahezu einzige Nektarquelle viele Bienen und Hummeln an

<sup>1</sup>Bartels (1993, S. 144); <sup>2</sup>Schütt et al. (1994b, *T. tomentosa*); <sup>3</sup>Roloff & Bärtels (2014, S. 694f.); <sup>4</sup>GALK (2019)

---