

Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven

(Mit 5 Tabellen)

ASTRID MOSER^{1,*}, THOMAS RÖTZER¹, STEPHAN PAULEIT²) UND HANS PRETZSCH¹)

(Angenommen Oktober 2017)

DOI-Nummer: 10.23765/afz0002006

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Grüne Infrastruktur; Ökosystemleistungen; Klimawandel.

Green infrastructure; ecosystem services; climate change.

¹) Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München, Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising, Deutschland.

²) Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Technische Universität München, Emil-Ramann-Str. 6, D-85354 Freising, Deutschland.

^{*}) Korrespondierende Autorin: ASTRID MOSER. Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2, D-85354 Freising, Germany, Telefon +49 8161 71 5409. E-Mail: astrid.moser@lrz.tum.de

1. EINLEITUNG

Als Folge der Urbanisierung steigt die Zahl der in Städten lebenden Menschen kontinuierlich an. Laut Prognosen der UNO wird weltweit bis 2030 die Stadtbevölkerung mehr als 60% der Gesamtbevölkerung ausmachen und bis 2050 auf 6 Milliarden ansteigen (UN, 2014). Die Effekte und Folgen der Urbanisierung sind komplex und betreffen soziale, ökonomische und ökologische Belange (VERBEIREN et al., 2013). Zu den Effekten zählen vermehrt versiegelte Flächen (SCALENGHE und MARSAN, 2008) und ein höheres Verkehrsaufkommen, während erhöhter Regenwasserabfluss einhergehend mit verringerter Versickerung (ARMSON et al., 2013b; MEJIA und MOGLEN, 2010), ein steigender Lärmpegel und Schadstoffbelastungen der Luft (GONG et al., 2012),

veränderte Strahlen- und Temperaturbelastung (AKBARI et al., 2001) und negative Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (FORASTER et al., 2011) als Folgen der Urbanisierung zu betrachten sind. Insbesondere der städtische Wärmeinseleffekt („urban heat island“ UHI) (OKE, 1982; PONGRACZ et al., 2010; WILBY, 2003) wird zumeist als Folge der Urbanisierung genannt, welcher durch höhere Temperaturen im Vergleich zum Umland ebenso wie durch höhere Maximaltemperaturen und eine hohe Wärmespeicherung gekennzeichnet ist. Gründe dafür sind die hohen Anteile versiegelter Flächen wie Asphalt oder Gebäude, welche die einfallende Sonnenstrahlung absorbieren und als Wärmeenergie wieder abgeben (SANTAMOURIS et al., 2001). Verminderte Windbewegungen erhalten die warme Luft in der Stadt, was zu der urbanen Grenzschicht führt (OSSENBRÜGGE und BECHTEL, 2010). Daneben sind in der Stadt oft nur geringe Grünanteile vorhanden, welche eine Kühlwirkung erzielen könnten (COLLIER, 2006; KUTTLER, 2004; RAHMAN et al., 2017b).

Derzeitige Prognosen sagen eine Verstärkung der angesprochenen Probleme in der Stadt durch den Klimawandel voraus (COBURN, 2009; SAVI et al., 2015). Extremwetterereignisse wie Starkregen, Unwetter und extreme Hitze werden vermehrt auftreten. Sintflutartige Niederschläge wie zum Beispiel im Juni 2016 als in Bayern bis zu 150 Liter pro Quadratmeter innerhalb von wenigen Tagen fielen, können häufiger vorkommen. Große Wassermengen führen zu Folgeproblemen wie Überlastung der Kanalisation und Überschwemmungen. Auch werden die Temperaturen deutlich steigen, nach dem IPCC Klimaszenarien wird es bis in 60 Jahren zu einer Erwärmung von 2 bis 4,5°C in Deutschlands kommen, wobei insbesondere nachts hohe Temperaturen auftreten können (IPCC, 2013). Tropennächte (Minimum > 20°C), welche bis vor wenigen Jahren noch kaum in Deutschland vorkamen, werden gehäuft auftreten. Die Anzahl der Sommertage (Tagesmaximum > 25°C) und der heißen Tage (Tagesmaximum > 30°C) werden voraussichtlich deutlich zunehmen (IPCC, 2013). Um diesen Trends entgegenzuwirken und ein für den Menschen weniger belastendes Stadtklima zu fördern, wird vermehrt im Bereich klimaangepasster Städte geforscht. Einrichtungen wie das „Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK)“ (www.zsk.tum.de) und das Projekt „Future Cities“ (LIPPEVERBAND, 2013) beschäftigen sich mit der Leistungsfähigkeit von grüner Infrastruktur für das Stadtklima und den thermischen Komfort. Neben Dach- und Fassadenbegrünung werden insbesondere die Wirkungen und Leistungen von Stadtbäumen für das Klima und den Menschen näher untersucht (HANSEN et al., 2017; PAULEIT et al., 2011; RAHMAN et al., 2011; SHASHUABAR und HOFFMAN, 2003).

Aufgrund ihres prägnanten Erscheinungsbildes und ihrer Größe werden insbesondere Stadtbäume mit dem Begriff Stadtgrün in Verbindung gebracht und auch die Leistungen und Funktionen des Stadtgrüns beziehen sich oft auf die der Stadtbäume (MCPHERSON et al., 1997; TYRVÄINEN et al., 2005). Eine intensive Erforschung der Stadtbäume hat erst vor wenigen Jahrzehnten begonnen und steckt im Vergleich mit der jahrhundertalten

Forstwissenschaft noch in den Kinderschuhen. Es fehlt an Datensätzen und Wissen, so liegen beispielsweise allometrische Wachstumsbeziehungen speziell für Stadtbäume nur begrenzt und für wenige Arten vor und Angaben zu ihrer Leistungsfähigkeit wie Kohlenstoffspeicherung, Sauerstofffreisetzung, Abkühlungswirkung und Beschattung beruhen vielfach auf groben Schätzungen (PEPER et al., 2014; RUST, 2014; SEMENZATO et al., 2011). Bisher erfolgten Pflanzungen zumeist anhand langjähriger Erfahrung von Gartenämtern oder anhand von Literatur und Pflanzlisten (z.B. GALK e. V. (2016), GAIDA und GROTHE (2000), ROLOFF und BÄRTELS (2008), KRÜSSMANN (1970), ROLOFF (2013)) und orientieren sich weniger an den Leistungen des Baumes sondern an der gärtnerischen und ökologischen Eignung für städtische Pflanzungen. Eine verbesserte wissenschaftliche Kenntnis der Ansprüche einzelner Baumarten und das Wissen ihrer Leistungen für das Stadtklima ist im Hinblick auf den Klimawandel und der Problematik vermehrter Schädlinge im Stadtbaumbereich dringend notwendig (TUBBY und WEBBER, 2010). Aufgrund fehlender Datensätze wird für die Modellierung von Wachstum und Umweltleistungen oftmals auf bestehendes Wissen aus Waldbeständen zurückgegriffen (AGUARON und MCPHERSON, 2012; PEPER et al., 2014; PRETZSCH et al., 2015a). Stadtbäume unterscheiden sich jedoch von Waldbäumen deutlich (MCHALE et al., 2009; NOWAK und CRANE, 2002), insbesondere hinsichtlich ihres Wuchsraumes (vgl. Kapitel 2). Auch stehen bei Stadtbäumen der ästhetische Gedanke und ihre Klimafunktionen im Vordergrund (BOLUND und HUNHAMMAR, 1999; PAULEIT et al., 2011), während der Nutzen von Forstbeständen eher auf den Holzbedarf ausgerichtet ist.

Mit dieser Literaturstudie wird der aktuelle Wissensstand zur Struktur und Dynamik von Stadtbäumen sowie Funktionen und Leistungen der Stadtbäume dargestellt. Insbesondere wurden Leistungen von Stadtbäumen, welche für zukünftige Stadtplanung unter dem Einfluss des Klimawandels besonders wichtig sein werden, herausgearbeitet. Es wurden weltweit Schlüsselstudien der Stadtbaumforschung herangezogen sowie neue Forschungsansätze und Studien vorgestellt, um neue Forschungsansätze und Perspektiven aufzuzeigen. Die Ziele der Studie sind:

- Analyse des Wachstums, des Wuchsraumes, der Artenzusammensetzung und Wahrnehmung von Stadtbäumen im Vergleich zu Forstbeständen,
- Darlegung und Diskussion der wichtigsten Leistungen von Stadtbäumen und der durch Stadtbäume entstehenden Risiken für Mensch und Umwelt,
- Darstellung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf das Wachstum und die Funktionen von Stadtbäumen,
- Analyse zukünftiger Forschungsperspektiven und Wissenslücken im Bereich der Stadtbaumforschung.

2. STRUKTUR UND DYNAMIK VON STADTBÄUMEN

Stadtbäume können als Bäume definiert werden, die an typischen urbanen Standorten wie Straßenzügen, an Parkplätzen, vor öffentlichen Gebäuden, in Stadtparks,

in Industriegebieten und an Gleisen oder ähnlichem zu finden sind. In Nordamerika wird die Gesamtheit der städtischen Gehölzbestände als „Urban Forest“ bezeichnet (MOLL, 1989). Der Wuchsraum der Stadtbäume ist im Gegensatz zum typischen Waldstandort sehr unterschiedlich und häufig geprägt von wachstumshindernden Faktoren wie stark eingeschränktem Wuchsraum (BÜHLER et al., 2007; GRABOSKY und BASSUK, 1995), geringer Wasser-, Luft- und Nährstoffverfügbarkeit (MORGENROTH und BUCHAN, 2009; RAHMAN et al., 2013), hohen Temperaturen (AKBARI et al., 2001; DAY et al., 2010), starker Bodenverdichtung und Asphaltierung (Bühler et al., 2007; DAY et al., 1995), ebenso wie Schadstoffeintrag durch Hundeurin und Streusalz (CEKSTERE et al., 2008; PETERSEN und ECKSTEIN, 1988; WHITLOW und BASSUK, 1986). Da Stadtbäume jedoch oft ohne direkte Konkurrenz zu anderen Bäumen wachsen, können sie größere Dimensionen erreichen als Forstbäume (HASENAUER, 1997).

Die Artenzusammensetzung der Bäume in mitteleuropäischen Städten weicht stark von denen mitteleuropäischer Forstbestände ab. Während in Forsten zumeist Arten wie Fichte, Buche, Douglasie, Eiche und Kiefer dominieren (KREMER, 1998), sind in Städten Arten wie Linden, Ahorn und Ulmen ebenso zu finden wie exotische Arten wie z.B. Ginko, Schnurbaum und Lederhülsenbaum (GALK e.V., 2016; ROLOFF, 2013). So sind in Deutschland 171 Arten nach der GALK Straßenbaumliste eingestuft (GALK e.V., 2016). Diese Liste soll Daten über Größe und Verwendbarkeit von Bäumen in Städten bereitstellen und wurde 1975 auf der Sitzung der Gartenamtsleiter ins Leben gerufen (GALK e.V., 2016). Andere Klassifizierungsansätze (GAIDA und GROTHE, 2000; SOMMER, 2007; WARDA, 2001) orientieren sich eher an der Eignung und den Eigenschaften von Gehölzen bezüglich bestimmte Kriterien wie Ästhetik oder Lärmschutz (ROLOFF, 2013). Die Anzahl an gepflanzten Stadtbäumen variiert je nach Größe der Stadt, so umfasst der Straßenbaumbestand von Berlin beispielsweise 438.000 Bäume (STADT BERLIN, 2016). Für Dresden und Bremen, beides Städte mit etwa 500.000 Einwohnern, wird die Anzahl von Straßenbäumen auf 60.000-70.000 geschätzt (ROLOFF, 2013). Im Stadtgebiet von München bedeckten 1982 die Kronen der Stadtbäume und Sträucher einen Flächenanteil von immerhin 17%, ähnlich dem Flächenanteil der Gebäude (PAULEIT und DUHME, 2000).

2.1 Strukturmerkmale und Baumwachstum – Übersicht über funktionelle Gruppen

Trotz der vielen in Städten vorkommenden Baumarten ist der Stadtbaubestand meist von wenigen Arten dominiert. In Mitteleuropa zählen Linden *Tilia* zu den am häufigsten gepflanzten Arten (RADOGLU et al., 2009; ROLOFF, 2013), insbesondere die Winterlinde (*T. cordata*) (PAULEIT und DUHME, 2000). Weitere häufige Gattungen sind Ahorn *Acer*, Eichen *Quercus*, Kastanien *Aesculus*, Birken *Betulus*, Hainbuchen *Carpinus*, Eschen *Fraxinus*, Ulmen *Ulmus* ferner Platanen *Platanus* und in manchen Städten Robinien *Robinia* (GALK e.V., 2016; ROLOFF, 2013). Während einige dieser Arten eine weit

zurückreichende Bedeutung haben (z.B. Linde als Symbol des Dorfmittelpunktes und bevorzugter Baumart der Gärten des Barocks, Kastanie als typischer Baum der Biergärten in Süddeutschland), gelten einige neu eingeführte Arten wie der Götterbaum *Ailanthus altissima* oder die Robinie *Robinia pseudoacacia* inzwischen als Problemarten wegen ihrer starken ungewollten Vermehrung (DICKIE et al., 2014; DÖRKEN und STEINECKE, 2017; ROLOFF, 2017).

2.2 Modellhafte Abbildung von Struktur und Dynamik

Während für viele Waldbaumarten wie Fichte und Buche zahlreiche Studien zu allometrischen Beziehungen des Wachstums existieren, sind Studien zu den Wachstumsreaktionen von Stadtbäumen erst seit wenigen Jahren für einzelne Arten verfügbar (MCHALE et al., 2009; PEPPER et al., 2014). In *Tabelle 1* sind weltweit existierende Studien zu den allometrischen Wachstumsbeziehungen von Stadtbäumen zusammengetragen. Diese Informationen sind insbesondere für Stadtplaner von Bedeutung, um für einen Standort geeignete Baumarten zu finden, die den vorhandenen Wuchsraum optimal besetzen. Dabei wurden einige Arten, Regionen und Strukturdimensionen vermehrt untersucht, während noch viele Wissenslücken besonders für den südamerikanischen, asiatischen und afrikanischen Raum sowie einige europäische Länder bestehen. Aufgrund der Lebensraum- und Wuchsunterschiede von Wald- zu Stadtbäumen führt die Übertragung von Wachstumsbeziehungen von Waldbäumen auf Stadtbäume zu ungenauen Angaben der Baumdimensionen. Auch ein Transfer von bereits erhobenen allometrischen Beziehungen auf Stadtbäume anderer Wuchs- und Klimabedingungen kann zu abweichenden, ungenauen Aussagen führen (MCHALE et al., 2009; PEPPER et al., 2001a; PEPPER et al., 2001b). Eine exakte Angabe von beispielsweise Kohlenstoffbindung ist so nicht möglich. Auch wurden nur in wenigen Studien die Biomasse oder das Baumvolumen sowie die Blattfläche erfasst, denn mit diesen Parametern können Leistungen wie Kohlenstoffspeicherung und Abkühlungswirkung bestimmt werden.

3. FUNKTIONEN UND LEISTUNGEN VON STADTBÄUMEN

Funktionen und Leistungen von Stadtbäumen sind in den letzten Jahren stark in den Fokus der Forschung und der Öffentlichkeit gerückt. Sie lassen sich in mehrere Kategorien unterteilen: Bereitstellung von Ressourcen, regulierende Leistungen des Klimas wie z.B. Abkühlungswirkung und Beschattung sowie kulturelle und unterstützende Leistungen für die Lebensqualität und Biodiversität (MA, 2005). *Tabelle 2* stellt die Leistungen von Stadtbäumen (behandelt in Kapitel 3) und die Nachteile, die durch Stadtbäume (behandelt in Kapitel 4) entstehen können, dar. Schon seit einigen Jahren wird mit Pionierprojekten wie dem „Chicago Urban Forest Climate Project“ und auch der Software i-Trees (www.itreetools.org) versucht, die Ökosystemleistungen von Stadtbäumen zu quantifizieren und

Tab. 1

Weltweite Studien zu den Wachstumsbeziehungen von Stadtbaumarten. BHD = Brusthöhendurchmesser, BS = Baumscheibe, HT = Baumhöhe, CR = Kronenradius, CD = Kronendurchmesser, CB = Kronenansatzhöhe, CL = Kronenlänge, CPA = Kronenprojektionsfläche, CV = Kronenvolumen, LA = Blattfläche.

Studies on the allometric relationships of urban tree species worldwide, BHD = diameter at breast height, BS = Tree Pit, HT = Tree Height, CR = Crown Radius, CD = Crown Diameter, CB = Crown Base Height, CL = Crown Length, CPA = Crown Projection Area, CV = Crown Volume, LA = Leaf Area.

Studie von (Study by)	Land (Country)	Behandelte Arten (Studies Species)	Allometrische Beziehung für (Allometric Rela- tionship for)
Dahlhausen et al. 2016	weltweit	<i>Aesculus hippocastanum</i> , <i>Araucaria cunninghamii</i> , <i>Khaya senegalensis</i> , <i>Platanus acerifolia</i> , <i>Quercus nigra</i> , <i>Tilia cordata</i>	Alter, BHD, H _T , CR, BS
Larsen & Kristoffersen 2002	Dänemark	<i>T. cordata</i> , <i>Tilia europaea</i> , <i>Tilia euclora</i> , <i>Tilia platyphyllos</i>	Alter, BHD, H _T , CB, CR
Lukaszkiwicz & Kosmala 2008	Polen	<i>T. cordata</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>A. hippocastanum</i>	Alter, BHD, H _T
Lukaszkiwicz et al. 2005	Polen	<i>T. cordata</i>	Alter, BHD
Maco & McPherson 2003	USA	<i>Acer saccharinum</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Celtis sinensis</i> , <i>Cinnamomum camphora</i> , <i>F. excelsior</i> , <i>Fraxinus pennsylvanica</i> , <i>Fraxinus velutina</i> , <i>Ginkgo biloba</i> , <i>Gleditsia triacanthos</i> , <i>Lagerstroemia indica</i> , <i>Liquidambar styraciflua</i> , <i>Magnolia grandiflora</i> , <i>Pinus thunbergii</i> , <i>Pistacia chinensis</i> , <i>P. acerifolia</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Pyrus calleryana</i> , <i>Zelkova serrata</i>	Alter, BHD
Moser et al. 2005	Deutsch- land	<i>T. cordata</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i>	Alter, BHD, H _T , CD, CR, CL, CB, CV, CPA, Bio- masse, LA, BS
Peper et al. 2001a	USA	<i>G. biloba</i> , <i>A. saccharinum</i> , <i>F. excelsior</i> , <i>L. indica</i> , <i>P. acerifolia</i> , <i>P. calleryana</i> , <i>Z. serrata</i>	Alter, BHD, H _T , CD, CL, LA
Peper et al. 2001b	USA	<i>Callistemon citrinus</i> , <i>Cedrus deodara</i> , <i>Ceratonia siliqua</i> , <i>C. camphora</i> , <i>Cupaniopsis anacardioides</i> , <i>Eucalyptus ficifolia</i> , <i>Ficus microcarpa</i> , <i>Jacaranda mimosifolia</i> , <i>M. grandiflora</i> , <i>Melaleuca quinquenervia</i> , <i>Metrosiderus excelsus</i> , <i>Pinus canariensis</i> , <i>Podocarpus macrophyllus</i> , <i>Schinus terebinthifolius</i> , <i>Tristania conferta</i>	Alter, BHD, H _T , CD, LA
Peper et al. 2014	Kanada	<i>F. pennsylvanica</i> , <i>Fraxinus americana</i>	Alter, BHD, H _T , CD, CL
Pretzsch et al. 2015	weltweit	<i>Abies sachalinensis</i> , <i>A. hippocastanum</i> , <i>Araucaria cunninghamii</i> , <i>K. senegalensis</i> , <i>Picea glauca</i> , <i>P. acerifolia</i> , <i>Q. nigra</i> , <i>R. pseudoacacia</i> , <i>T. cordata</i>	Alter, BHD, H _T , CR, CV
Rijal et al. 2012	USA	<i>Fagus grandifolia</i> , <i>Betula populifolia</i> , <i>Betula papyrifera</i> , <i>Acer rubrum</i> , <i>Quercus rubra</i> , <i>Acer saccharum</i> , <i>Betula alleghaniensis</i> , <i>Abies balsamea</i> , <i>Picea mariana</i> , <i>Tsuga canadensis</i> , <i>Picea rubens</i> , <i>Pinus strobus</i> , <i>P. glauca</i>	BHD, H _T , CL
Rust 2014	Deutsch- land	<i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>A. hippocastanum</i> , <i>Aesculus×carnea</i> , <i>B. pendula</i> , <i>P. acerifolia</i> , <i>T. cordata</i>	Alter, BHD, H _T , Biegesteifigkeit
Sanders & Grabosky 2014	USA	<i>A. rubrum</i> , <i>Prunus serrulata</i> , <i>P. calleryana</i> , <i>Quercus palustris</i> , <i>Z. serrata</i>	BHD, H _T , CD, Pflanzgrube
Sanders et al. 2013	USA	<i>Acer platanoides</i> , <i>A. rubrum</i> , <i>A. saccharinum</i> , <i>A. saccharum</i> , <i>G. triacanthos</i> , <i>P. acerifolia</i> , <i>P. calleryana</i> , <i>Q. palustris</i> , <i>Q. rubra</i> , <i>T. cordata</i> , <i>Z. serrata</i>	BHD, Pflanzgrube
Semenzato et al. 2011	Italien	<i>Tilia x vulgaris</i> , <i>Fraxinus angustifolia</i> , <i>A. platanoides</i> , <i>Prunus cerasifera</i> , <i>L. indica</i>	Alter, BHD, LA
Soares et al. 2011	Portugal	<i>Celtis australis</i> , <i>C. sinensis</i> , <i>Celtis occidentalis</i> , <i>J. mimosifolia</i>	BHD, CL, CD
Stoffberg et al. 2008	Südafrika	<i>Combretum erythrophyllum</i> , <i>Rhus lancea</i> , <i>Rhus pendulina</i>	Alter, BHD, H _T , CB, CD, CL
Troxel et al. 2013	USA	<i>Acer spp.</i> , <i>Cornus spp.</i> , <i>G. triacanthos</i> , <i>Malus spp.</i> , <i>P. cerasifera</i> , <i>P. serrulata</i> , <i>P. calleryana</i> , <i>Quercus spp.</i> , <i>Syringa reticulata</i> , <i>Tilia spp.</i>	Alter, DBH, H _T , CD, CV
Yoon et al. 2013	Korea	<i>Acer buergerianum</i> , <i>G. biloba</i> , <i>Platanus orientalis</i> , <i>Prunus yedoensis</i> , <i>Z. serrata</i>	BHD, CPA, Volu- men, Biomasse

monetär zu bewerten (McPHERSON et al., 1997; NOWAK und CRANE, 2002). Insbesondere die Reduzierung von thermischem Stress bei Menschen werden unter dem Aspekt der Wärmeinsel der Stadt und des Klimawandels bereits intensiv untersucht (LUBER und MCGEEHIN, 2008; SAKKA et al., 2012). Auch GEORGI und DIMITRIOU (2010) haben für Thessaloniki, Griechenland den Einfluss von urbanem Grün auf die Umwelt untersucht, ebenso wie Pretzsch et al. (2015b) für München und Würzburg in Deutschland.

Folgend wird genauer auf die Leistungen eingegangen, welche für zukünftige Stadtplanung, insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel von Bedeutung sein werden. Dazu zählen besonders die regulierenden Ökosystemdienstleistungen wie Abkühlungswirkung und Beschattung.

3.1 Kohlenstoffbindung

Im Gegensatz zu Forstbeständen stellen Stadtbäume zwar nur einen kleinen Teil der weltweiten Baumbestände dar (KLEIN und SCHULZ, 2012), jedoch können auch sie

einen Beitrag zur Bindung von CO₂ aus der Atmosphäre leisten (STROHBACH und HAASE, 2012). Einige Forschergruppen haben deshalb versucht, die Kohlenstoffspeicherkapazität der gesamten Vegetation einzelner Städte zu bestimmen (Tabelle 3). Die Angaben zur gesamten Kohlenstoffspeicherung (von Bäumen gebunden) schwanken dabei erheblich, von 178 tC bis über 1,2 Millionen tC, wobei die Speicherung pro Fläche ein vergleichbareres Maß darstellt.

Die verwendeten Methoden zur Bestimmung des gespeicherten Kohlenstoffs sind dabei sehr unterschiedlich und oftmals ungenau. Zum einen kann die gespeicherte Menge an Kohlenstoff über die Biomasse der Bäume oder Baumkompartimente mithilfe von allometrischen Beziehungen berechnet werden (AGUARON und MCPHERSON, 2012; MOSER et al., 2015; TIMILSINA et al., 2014; YOON et al., 2013). Solche Studien auf Baumebene sind jedoch lokal und in ihrem Umfang begrenzt. Auch sind allometrische Gleichungen für die Stadtvegetation kaum vorhanden, weshalb oftmals auf Gleichungen für Forstbestände zurückgegriffen werden muss (AGUARON und MCPHERSON, 2012). Weiter können

Tab. 2

Zusammenfassung der Leistungen (Kapitel 3) von Stadtbäumen und Nachteile durch Stadtbäume (Kapitel 4). BVOCs = Biogenic Volatile Organic Compounds oder biogene flüchtige organische Verbindungen.

Services (chapter 3) and disservices (chapter 4) of urban trees. BVOCs = Biogenic Volatile Organic Compounds.

Ökosystemleistung (Ecosystem Services)	Referenz (Reference)
Bereitstellend (Provisioning):	
- Nahrung (<i>Food</i>)	MA (2005), Gómez-Baggethun & Barton (2013)
- Holz und Biomasse (<i>Wood and biomass</i>)	Timilsina et al. (2014), Nowak et al. (2008)
- Wasser (<i>Water</i>)	Foster et al. (2011), MA (2005)
- Medizinische Ressourcen (<i>Medicinal resources</i>)	MA (2005)
Regulierend (Regulating):	
- Kohlenstoffbindung (<i>Carbon storage</i>)	McPherson (1998), Davies et al. (2011)
- Abkühlung (<i>Cooling</i>)	Rahman et al. (2015), Konarska et al. (2015)
- Beschattung (<i>Shading</i>)	Gómez-Muñoz et al. (2010), Armson et al. (2013a)
- Verbesserung der Luftqualität (<i>Air quality improvement</i>), Feinstaubausfilterung (<i>Particulate matter filtering</i>)	Escobedo & Nowak (2009), McPherson et al. (1998)
- Hochwasserschutz (<i>Mitigation of rainwater-runoff</i>)	Sæbø et al. (2012), McDonald et al. (2007)
- Lärminderung (<i>Mitigation of noise</i>)	Armson et al. (2013b), McPherson et al. (1994)
Kulturell (Cultural):	
- Erholung (<i>Recreation</i>)	Nowak & Dwyer (2007), Dwyer et al. (1992)
- Lebensqualität (<i>Life quality</i>)	Gómez-Baggethun & Barton (2013)
Unterstützend (Supporting):	
- Lebensraum (<i>Habitat</i>)	Vogt et al. (2009), Kühn et al. (2004)
- Biodiversität (<i>Biodiversity</i>)	de Groot et al. (2002), TEEB (2011)
Nachteile durch Bäume (Disservices)	
Baumteile (Tree organs):	
- Verschmutzung (<i>Polluting</i>)	Lohr et al. (2004), Dobbs et al. (2011)
- Beschädigungen (<i>Damages</i>)	Escobedo et al. (2011), Gilman (2007)
Nachteile für den Menschen (For humans):	
- Allergene (<i>Allergens</i>)	Carinanos et al. (2014), D'Amato et al. (2007)
- BVOCs (<i>BVOCs</i>)	Grote et al. (2013), Nowak & Dwyer (2007)
Kosten durch Pflege und Neupflanzungen, Administration (<i>Costs for maintenance and new plantings, administration</i>)	Roy et al. (2012), Soares et al. (2011)

Tab. 3

Ausgewählte Studien zur gesamten Kohlenstoffspeicherung von Stadtbäumen.
Selected studies worldwide on the whole carbon storage capacity of urban trees.

Kohlenstoffspeicherung [tC] (Carbon Storage [tC])	Kohlenstoffdichte [C/m ²] (Density [C/m ²])	Stadt (City)	Land (Country)	Studie von (Study by)
1.225.200	7,3	New York	USA	Nowak & Crane (2002)
481.000	9,0	Philadelphia	USA	Nowak & Crane (2002)
19.300	4,4	Jersey City	USA	Nowak & Crane (2002)
196.000	NA	San Francisco	USA	Nowak et al. (2007)
21.030	NA	Lissabon	Portugal	Soares et al. (2011)
178,8	56,9	Leicester	UK	Davies et al. (2011)
337.000	NA	Shenyang	China	Liu & Li (2012)

Softwaretools wie i-Tree verwendet werden, welche auf Basis von vermessenen Plots die Kohlenstoffspeicherung der gesamten Stadtvegetation hochrechnet und dazu Baumkatasterdaten verwendet (NOWAK und CRANE, 2002).

3.2 Kühlung und Beschattung

Angesichts des Klimawandels und der städtischen Wärmeinsel sind die Abkühlungswirkung und Beschattung durch Stadtbäume eine der wichtigsten und derzeit am meisten erforschten Umweltleistungen (BOWLER et al., 2010; GILL et al., 2007; SHASHUA-BAR und HOFFMAN, 2003). Bäume kühlen ihre Umgebung durch Evapotranspiration und reduzieren die Umgebungstemperatur durch Beschattung (AKBARI et al., 2001; RAHMAN et al., 2011). Durch die Belaubung wird Sonnenlicht und Strahlung abgehalten, die einfallende Sonnenenergie wird von den Blättern zur Photosynthese und Transpiration genutzt (ARMSON et al., 2013a; ZHAO und RUNNING, 2010). Folglich wird im Vergleich zu bebauten Bereichen die umgebende Luft stärker abgekühlt (LEUZINGER et al., 2010). Studien zeigen, dass die Blatttemperatur 11–30°C kühler sein kann als umgebende bebaute Flächen. Dabei werden die größten Unterschiede zur Mittagszeit während heißen, sonnigen Tagen erreicht, wobei Bäume verglichen mit Gras und begrüntem Dächern die größten Effekte erzielen (ARMSON et al., 2013a; LEUZINGER et al., 2010). Die einfallende UV-Strahlung kann von großen, dichten Kronen bis zu 90% reduziert werden (ARMSON et al., 2013a), sodass die Oberflächentemperatur im Baumschatten um 12–20°C geringer sein kann (ARMSON et al., 2012). Trotz der großen Relevanz ist die Quantifizierung der Transpirationsleistung und Abkühlungswirkung durch Bäume aufgrund der stark heterogenen städtischen Umgebung und großen Baumartenunterschieden äußerst schwierig (ENNOS et al., 2014; RAHMAN et al., 2017b). Das Ausmaß der Kühlungswirkung von Bäumen ist eng von Strukturparametern wie der Blattfläche, Kronengröße und Alter abhängig (LIN und LIN, 2010; MCPHERSON und PEPER, 2012; SHAHIDAN et al., 2010).

RAHMAN et al. (2017b) haben beispielsweise die Abkühlungsleistung bzw. den Energieentzug aus der Atmosphäre von Winterlinden an zwei unterschiedlichen Plätzen in München untersucht. Dabei zeigte sich, dass Winterlinden aufgrund ihrer Wasserstressstrategie eine gute Abkühlungswirkung auch bei Trockenheit aufweisen, dieser Wasserverlust jedoch das Wachstum reduziert (MOSER et al., 2016a). Deshalb sind Winterlinden bei Trockenperioden nur bedingt als Stadtbäume zu empfehlen, denn um langfristig Wachstums- und Vitalitätseinbußen zu verhindern, kann Bewässerung notwendig werden. Jedoch sind auch Unterschiede in der Kühlungswirkung von zerstreut- und ringporigen Baumarten zu beachten. Während zerstreutporige Winterlinden wegen ihrer hohen Transpirationsleistung und dichten Belaubung bei stark asphaltierten Standorten bei ausreichend Wasserverfügbarkeit im Wurzelraum stärker kühlen, sind ringporige und lichtkronige Robinien bei offenen Grasflächen von Vorteil. Da Robinien weniger Wasser verbrauchen, resultiert dies in höherer Bodenfeuchte, die dann vom Boden und durch den Rasen verdunsten kann, um die Luft zu kühlen (RAHMAN et al., 2017a). Die Kühlungsleistung der Stadtvegetation durch Beschattung und Verdunstung und deren Effekte auf das Stadtklima sind besonders wichtig für den thermischen Komfort von Menschen (MATZARAKIS und AMELUNG, 2008). Jedoch müssen weitere Untersuchungen erfolgen, ob der Komfort von Menschen unter mehr durch Verdunstung kühlende Bäumen größer ist als unter Bäumen, welche aufgrund ihrer Belaubung mehr direkten Schatten spenden und somit Strahlungseinfall vermindern. Hierbei können mikroklimatische Modellierungsansätze wie von ZÖLCH et al. (2016) zum Einfluss von grüner Infrastruktur auf den Hitzestress und den thermischen Komfort von Menschen Aufschluss geben.

3.3 Feinstaubausfilterung

Feinstaub (particulate matter, PM) entsteht durch anthropogene Prozesse wie Industrieanlagen und Autoabgase, speziell durch die Verbrennung von Dieselmotoren und besteht aus einer Mischung von

Schwermetallen, Kohlenstoffen, aromatischen Kohlenwasserstoffen und weiteren in Luft gelösten Substanzen (BELL et al., 2011; HONOLD, 2016). Die größte Belastung der Luft ist aufgrund erhöhten Verkehrsaufkommens in der Stadt am frühen Vormittag und am Nachmittag nachzuweisen (ZHAO et al., 2009). Anhand der Partikelgröße wird Feinstaub in PM₁₀, PM_{2,5} und PM_{0,1} eingeteilt (SÆBØ et al., 2012). Eine hohe Feinstaubbelastung kann für den Menschen gesundheitliche Folgen wie Herz-Kreislauferkrankungen, Herzinfarkt und hoher Blutdruck zur Folge haben. Insbesondere kleine Partikel können weitere negative Folgen wie Atemwegserkrankungen nach sich ziehen (GAN et al., 2010; JARUP et al., 2008; ROSS et al., 2011). Deshalb ist besonders für Risikogruppen (Kleinkinder, Senioren) die Minimierung des Reizes, d.h. die Ausfilterung von Feinstaub von großer Bedeutung (HONOLD, 2016; NOWAK et al., 2006; SÆBØ et al., 2012). Der Effekt von Stadtbäumen für die Feinstaubausfilterung wird von Forschern jedoch kontrovers diskutiert (MCPHERSON et al., 1998; NOWAK et al., 2006; SÆBØ et al., 2012), insbesondere im Hinblick der Kosteneffizienz. In *Tabelle 4* sind Studien bezüglich der Feinstaubreduzierung durch Stadtbäume dargestellt, die jedoch alle eine positive Wirkung von Stadtvegetation feststellen konnten.

Insgesamt zeigen Nadelbäume aufgrund ihrer höheren Blattfläche und ihrer dauerhaften Belaubung eine bessere Feinstaubausfilterung im Vergleich zu Laubbäumen (STOLT, 1982). Jedoch sind Nadelbäume anfälliger gegenüber Schadstoffbelastungen der Luft, während Laubbäume schädliche Gase besser ausfiltern können, weshalb eine Mischung aus Laub- und Nadelgehölzen für die Luftqualität in Städten am sinnvollsten wäre (BOLUND und HUNHAMMAR, 1999; STOLT, 1982).

3.4 Lärminderung

Lärm kann schwerwiegende gesundheitliche Folgen verursachen: Zu nennen sind vor allem psychologische Belastungen, die zu einer beeinträchtigten Leistungsfähigkeit, Konzentrationsstörungen und Schlafstörungen führen aber auch körperliche Folgen wie Bluthochdruck und hormonelle Störungen nach sich ziehen können (BOLUND und HUNHAMMAR, 1999; ROSS et al., 2011). Luftverschmutzungen, Lärm und Wind hängen oftmals in ihrer Ausprägung voneinander ab, eine Zunahme von Lärm aufgrund von höheren Windgeschwindigkeiten bedingt eine Abnahme von Luftpartikeln wie Stickstoffoxiden und Kohlenwasserstoffen (ROSS et al., 2011). Auch die Erhöhung des Anteils unbefestigter Oberflächen und Vegetation kann das Lärmniveau verringern. Hierbei haben immergrüne Bäume aufgrund ihrer durchgehenden Belaubung Vorteile (BOLUND und HUNHAMMAR, 1999; ROY et al., 2012). Zur Lärmreduzierung wird empfohlen, Bäume und Sträucher nahe an der Lärmquelle und nicht am Lärmempfänger zu pflanzen, da Laub und Stamm den Lärm zerstreuen, während Boden Lärm absorbiert (AYLOR, 1972; COOK, 1978; NOWAK und DWYER, 2007). Auf diese Weise können bis zu 50% des Lärms reduziert werden, was 6 bis 10 dB (A) entspricht (COOK und VAN HAVERBEKE, 1971; NOWAK und DWYER, 2007).

3.5 Abflussminderung

Stark bebaute Gebiete mit hohen Anteilen von asphaltierten Straßen weisen einen veränderten Wasserabfluss auf verglichen mit ländlichen Gebieten (TRATALOS et al., 2007). Insbesondere Starkregen verursacht große Mengen an abfließendem Oberflächenwasser mit erhöhten Gefahren von Überflutungen. Ebenso sinkt die Wasser-

Tab. 4

Studien zur Feinstaub (PM)-Reduzierung durch Stadtbäume.
Studies on particulate matter (PM) reduction by urban trees.

Studie von (<i>Study by</i>)	Stadt, Land (<i>City, Country</i>)	Wirkung (<i>Effect</i>)
Beckett et al. (2000)	UK	Größere Bäume mit höherer Blattfläche können mehr PM ₁₀ entfernen als kleinere Bäume
Cavanagh et al. (2009)	Christchurch, Neuseeland	Stadtbäume können PM ₁₀ signifikant reduzieren
Escobedo et al. (2008)	Santiago de Chile, Chile	Die Unterhaltung von Stadtbäumen ist eine kosteneffiziente Lösung zur Reduzierung von PM
Jim & Chen (2008)	Guangzhou, China	Stadtbäume reduzieren die Schadstoffbelastung der Luft um jährlich 312,03 Mg
McDonald et al. (2007)	Glasgow & Westmidlands, UK	Durch eine Erhöhung des Baumanteils können bis zu 26% (200 t) PM ₁₀ reduziert werden
Nowak et al. (1994)	Chicago, USA	Stadtbäume reduzieren die PM ₁₀ -Belastung um 234 t pro Jahr
Nowak et al. (2006)	USA	Stadtbäume in USA können bis zu 711.000 t PM ₁₀ reduzieren
Sæbø et al. (2012)	Norwegen & Polen	Je nach Art können Stadtbäume PM unterschiedlich reduzieren, größte Wirkung hatten Nadelbäume und die Weißbirke
Tallis et al. (2011)	London, UK	Stadtvegetation entfernt jährlich zwischen 852 und 2121 t PM ₁₀
Yang et al. (2005)	Peking, China	Bäume im Stadtzentrum können in einem Jahr 772 t PM ₁₀ entfernen
Yin et al. (2011)	Shanghai, China	Stadtvegetation kann im Sommer bis zu 9,1% PM reduzieren

qualität durch aufgenommene Schmutzpartikel, Abflusssysteme können aufgrund größerer Verunreinigungen leicht verstopfen. Zudem kann die hohe Flächenversiegelung ein Absinken des Grundwasserspiegels verursachen (HAUGHTON und HUNTER, 1994). Vegetation im Stadtbereich kann dieses Problem deutlich verringern: Zum einen können Bäume, Dachbegrünungen und Grasflächen Regenwasser zurückhalten und versickern. Daneben kann Vegetation im Boden gespeichertes Wasser aufnehmen und verdunsten. Diese Prozesse reduzieren somit den Abfluss und minimieren die Gefahr von Überflutungen (ENNOS et al., 2014). Die Reduzierung des Abflusses durch Vegetation wurde bisher aus Daten extrapoliert, die von kleinräumigen Experimenten stammen (ARMSON et al., 2013b; MCPHERSON et al., 1994). Die Ergebnisse dieser Studien haben gezeigt, dass bis zu 60% des Regenwassers auf asphaltierten Flächen direkt in die Kanalisation abfließt, während der Abfluss durch Vegetation fast vollständig vermindert wurde (ARMSON et al., 2013a; ENNOS et al., 2014). Insbesondere Bäume können aufgrund ihrer Interzeptionswirkung Regenwasser zurückhalten, Verdunsten und somit zu einem angenehmeren Stadtklima beitragen.

3.6 Ansätze zur monetären Bewertung der Funktionen und Leistungen von Stadtbäumen

Um den Wert von Stadtbäumen bewerten zu können, wurden Ansätze zur monetären Beurteilung entwickelt. In dem „Chicago Urban Forest Climate Project“ wurde eine Kosten-Nutzen-Rechnung für eine typische Stadtbaumart, die Grün-Esche *Fraxinus pennsylvanica* aufgestellt. Nach Abzug von Pflanzungs- und Unterhaltskosten wurde ein Wert von \$38 Millionen insgesamt oder \$402 pro Baum berechnet (MCPHERSON et al., 1994). Andere Forscher haben einzelne Aspekte der Umweltleistungen in geldwerte Beträge umgerechnet und monetäre Ersparnisse durch Smogreduktion, Feinstaubfilterung und Abkühlungswirkung von gepflanzten Bäumen auf \$273 Millionen pro Jahr geschätzt (ROSENFELD et al., 1998). Nach AKBARI et al. (2001) beläuft sich die jährliche Wirtschaftsleistung der Stadtbäume in Los Angeles auf \$211 pro Baum. Von SANDER et al. (2010) wurde dagegen ein Modell entwickelt, welches den Einfluss von Baumdichte auf den Wert von Eigentum je nach Entfernung berechnet. So kann eine Erhöhung der Baumdichte von 10% innerhalb von 100 m zu einem Grundstück den Grundstückspreis um \$1371 (0,48%) erhöhen.

4. RISIKEN DURCH STADTBÄUME UND GEGENSTEUERENDE MASSNAHMEN

Neben den genannten positiven Leistungen entstehen durch Stadtbäume auch Schäden und Nachteile (DOBBS et al., 2014; ESCOBEDO et al., 2011; ROLOFF, 2013). Diese sind jedoch ebenso wie die positiven Umweltleistungen abhängig von der gepflanzten Art und des Zustandes bzw. der Vitalität eines Baumes. An vorderster Stelle müssen Sach- und Personenschäden durch abbrechende und herabfallende Pflanzenteile, vor allem Äste genannt werden. Zudem können Bäume Krankheiten und Schadinsekten beherbergen (CARINANOS und CASARES-PORCEL,

2011; DOBBS et al., 2011). Auch Frucht- und Laubfall, herunterfallende Pollen und Pflanzensäfte führen oft zu Ärgernissen und teils hohe Kosten für ihre Beseitigung. Falsch gepflanzte Arten können zu Schäden an Asphalt und Wegen führen sowie Lichteinfall in Wohnungen verhindern (ESCOBEDO et al., 2011). Daneben wird durch die Transpiration der Bäume die Luftfeuchtigkeit erhöht. Seit einigen Jahren ist auch die Emission von sog. biogenen flüchtigen organischen Verbindungen (biogenic volatile organic compounds, BVOCs) von Stadtbäumen in den Fokus der Forschung gerückt (CALFAPIETRA et al., 2013; CARINANOS und CASARES-PORCEL, 2011; GREGG et al., 2003; GROTE, 2009; GROTE et al., 2013). Bei Stress erzeugen Bäume BVOCs, was wiederum die Ozonbildung begünstigt und somit Smogprobleme verstärken kann (CARINANOS und CASARES-PORCEL, 2011; DOMM et al., 2008). Weiterhin können bestimmte Baumarten allergische Reaktion wie Asthma und Heuschnupfen auslösen (DOBBS et al., 2011; ESCOBEDO et al., 2011; LYTTIMÄKI und SIPILÄ, 2009; NOWAK und DWYER, 2000).

4.1 Allergene

Die Freisetzung von Blütenstaub während der Blütezeit ist die mit am häufigsten genannte negative Eigenschaft von Stadtvegetation: 30–40% der Weltbevölkerung reagieren allergisch auf Blütenstaub (CARINANOS et al., 2014; PAWANKAR et al., 2011). Auch ist die Wahrscheinlichkeit an einer Pollenallergie zu leiden bei Stadtbewohnern um 20% höher als bei Menschen, die auf dem Land wohnen (CARINANOS und CASARES-PORCEL, 2011). Dies hat direkte Auswirkungen wie Kosten für Ärzte, Medizin und Untersuchungen, aber auch indirekte Folgen wie verpasste Arbeits- und Schulzeit, frühzeitiger Ruhestand und immaterielle Auswirkungen wie ein Verlust der Lebensqualität (CARINANOS et al., 2014; GREEN und DAVIS, 2005; REED et al., 2004). In den USA wurden die ausschließlich aus den direkten Folgen resultierenden Kosten auf \$2–\$5 Milliarden pro Jahr geschätzt (REED et al., 2004). CARINANOS et al. (2014) haben einen Index zur Bestimmung der Allergenität von Stadtbäumen entwickelt, welche das allergische Potential, die Bestäubungsstrategie und die Dauer des Bestäubungszeitraums, Baumgröße und Anzahl der Individuen pro Art berücksichtigt. Auch das allergische Potential verschiedener Arten wurde bewertet, wobei für Europa die höchsten Risiken bei mehreren *Cupressus*-Arten, Olive *Olea europaea*, Birkengewächse *Betulaceae* und *Platanus hispanica* gefunden wurden (CARINANOS et al., 2014; D'AMATO et al., 2007; HRUSKA, 2003). In europäischen Städten stellen Birken, Hasel und Platane große Probleme dar. Birken und Hasel sind Frühblüher und aufgrund der hohen Gefahr einer Kreuzreaktivität mit anderen Pollen als besonders allergisch eingestuft (D'AMATO et al., 2007).

4.2 Herabfallende Baumteile und Verschmutzung durch Laub

Von der Bevölkerung werden Verschmutzungen durch herabfallende Baumteile wie Laub, Blütenstaub- und Blätter, Samen und Zweige negativ gesehen. Neben der Erzeugung von Abfall durch Baumteile sind herabtrop-

Tab. 5

**Jährliche Kosten für die Baumpflege, Verwaltung
und sonstige Kosten in Lissabon, Portugal, verändert
nach SOARES et al. (2011),**

**Yearly costs for tree management, administration and other
costs in Lisbon, Portugal, adapted from SOARES et al. (2011).**

Kosten (costs)	\$ Gesamt (\$ total)	\$ pro Baum (\$ per tree)
Baumpflege (tree management)	1.121.723	29,50
Verwaltung (administration)	409.600	2,93
Weitere Kosten (other costs)	256.000	6,20
Gesamtkosten (total)	1.882.323	45,64

fende, klebende Pflanzensäfte, insbesondere auf Asphalt und Autos, negative Eigenschaften von Stadtvegetation (LOHR et al., 2004). Darüber hinaus können größere herabfallende Äste, durch Sturm oder falsche Pflanz- und Schnitttechniken umfallende Bäume zu Sach- und Personenschäden führen (DOBBS et al., 2014; ESCOBEDO et al., 2011).

4.3 Emission von biogenen flüchtigen organischen Verbindungen (BVOCs)

Biogene flüchtige organische Verbindungen wie Isoprenoide, Monoterpene, Alkohole, Aldehyde, Ketone und Säuren werden von Bäumen in die Atmosphäre abgegeben (GROTE, 2009). Sie bestehen aus Fetten, Harzen und anderen pflanzlichen Produkten. Die Emission von BVOCs variiert je nach Art, Lufttemperatur und anderen Umwelteinflüssen. Funktionen von BVOCs für Pflanzen sind Hitzeschutz und Schutz vor Fressfeinden bzw. Anziehung von Bestäubern (GROTE et al., 2013; GUENTHER et al., 1994; NOWAK und DWYER, 2007; SHARKEY und SINGSAAS, 1995). Problematisch sind BVOCs, da sie zu der Bildung von Ozon und Kohlenmonoxid beitragen können. Es wird jedoch angenommen, dass eine höhere Anzahl von Bäumen die Emission von BVOCs und damit Ozon verringert. Dies wird mit der Temperaturabhängigkeit der BVOCs und der Abkühlungswirkung von Bäumen begründet (BRASSEUR und CHATFIELD, 1991; NOWAK und DWYER, 2000).

4.4 Unterhaltungskosten

Neben den genannten Nachteilen von Stadtbäumen entstehen für Pflanzung und Pflege auch Kosten. Zu letzteren zählen Ausgaben für Bewässerung, Schnitt und die Entfernung von schadhafte oder toten Individuen. Hinzu kommen Aufwendungen für Neupflanzungen, für die Instandsetzung von beschädigter Infrastruktur wie Gehsteigen oder des Asphaltbelags (ROY et al., 2012). SOARES et al. (2011) hat die Kosten für die Baumpflege, Verwaltung u. ä. auf insgesamt \$ 1,9 Millionen für die 41.247 Straßenbäume der Stadt Lissabon beziffert, wobei sich die Gesamtkosten pro Baum auf \$ 45,6 belaufen (Tabelle 5).

5. KLIMAWANDEL

Klimawandel äußert sich vor allem durch das Auftreten von hohen Temperaturen mit veränderter Nieder-

schlagverteilung (IPCC, 2013). Auch können extreme Wetterereignisse wie Trockenperioden, Überschwemmungen und Stürme mit höherer Frequenz und Intensität auftreten (DELLA-MARTA et al., 2007; IPCC, 2013). Die Auswirkungen des Klimawandels können den Wärmeinseleffekt in der Stadt verstärken und die Lebensbedingungen für Stadtbewohner sowie die Wachstumsbedingungen für Stadtbäume deutlich verschlechtern (DEFRA, 2012; GILL et al., 2013). Diese Zusammenhänge sind jedoch unzureichend untersucht. Gegensteuernde Maßnahmen, um die negativen Effekte des Klimawandels auf das Stadtklima abzumildern, werden dringend benötigt.

5.1 Versiegelung und Wärmeinseleffekt – Reaktionen von Stadtbäumen auf Klimawandel

Während die Zuwachsreaktionen von Waldbäumen und -beständen auf den Klimawandel bereits relativ gut untersucht wurden (ALLEN et al., 2010; DALE et al., 2001; LINDNER et al., 2010; PRETZSCH et al., 2014; RÖTZER et al., 2013), ist über die Reaktionen von Stadtbäumen, die sowohl dem Klimawandel als auch der städtischen Wärmeinsel ausgesetzt sind, viel weniger bekannt. In einer weltweiten Studie führten DAHLHAUSEN et al. (2016), PRETZSCH et al. (2015a) und PRETZSCH et al. (2017) Bohrkernentnahmen und -analysen an etwa 1600 Bäumen in 10 Metropolen in borealen bis subtropischen Klimazonen durch. Die Bohrkern wurden jeweils von einer Baumart je Stadt gewonnen, von Bäumen im Zentrum bis in den ruralen Bereich. Weil die Jahrringchronologien z.T. mehr als 100 Jahre zurückreichen, spiegeln sie sowohl die Wirkung der Klimaänderungen als auch des städtischen Wärmeinseleffekts auf das Baumwachstum wider (BARTENS et al., 2012; GILLNER et al., 2014; SCHWEINGRUBER, 1996). Dabei zeigte sich übergreifend, dass in allen Städten die Bäume gegenwärtig schneller wachsen und früher altern als in der Vergangenheit (PRETZSCH et al., 2017). Im Stadtzentrum ist dieser Effekt jedoch stärker ausgeprägt als in den peripheren Zonen. Auch in Städten der mediterranen und subtropischen Zonen (Kapstadt, Südafrika; Santiago de Chile, Chile; Hanoi, Vietnam; Houston, USA) eine verstärkte Wachstumsbeschleunigung im Vergleich zu Städten der humiden und temperierten Klimazonen (Sapporo, Japan; Prince George, Kanada; Berlin, Deutschland; Paris, Frankreich) gefunden. Offenbar haben die für das Baumwachstum positiven Effekte wie Temperaturan-

stieg, Verlängerung der Vegetationszeit, höhere CO₂-Konzentrationen der Luft (GEORGE et al., 2007; RÖTZER et al., 2000) gegenüber den negativen Aspekten wie einer Reduktion der Photosynthese durch BVOCs und Feinstaub oder Zuwachsminderung durch Trockenstress in den meisten Städten noch die Oberhand (MOSER et al., 2017; PRETZSCH et al., 2017). Diese Beschleunigung hat weitreichende Konsequenzen für alle Aspekte der Bewirtschaftung von Stadtbäumen (Pflanzung, Ersatzbeschaffung, räumliche Ausdehnung) und ihren Ökosystemleistungen (C-Bindung, Ästhetik, Luftbefeuchtung).

5.2 Anpassungsmaßnahmen

Gegensteuernde Maßnahmen sind nötig, um die Belastung der Stadtbäume durch den Klimawandel und die städtische Wärmeinsel zu verringern, um das Wachstum und die Leistungen von Stadtbäumen zu erhalten.

5.2.1 Pflanzmethode

SANDERS et al. (2013) und SANDERS und GRABOSKY (2014) konnten belegen, dass die Größe der Pflanzgrube einen signifikanten Effekt auf das Baumwachstum hat. Bäume mit einer größeren Pflanzgrube wiesen einen größeren Stammdurchmesser und Kronenradius auf. In Deutschland haben Städte Verordnungen für die Größe einer Pflanzgrube festgesetzt. So beträgt in Würzburg das Mindestvolumen einer Pflanzgrube für Straßenbäume 12 m³ (Stadt Würzburg, 2014), in München werden je nach Baumgröße 12 m³ bis 36 m³ für die Pflanzgrube vorgeschrieben (LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN und BAUREFERAT GARTENBAU, 2016). Eine größere Pflanzgrube ermöglicht Bäumen eine bessere Durchwurzelung, Wasser-, Sauerstoff- und Nährstoffverfügbarkeit. Daneben hat auch das verwendete Substrat einen großen Einfluss auf das Wachstum und die Vitalität von Stadtbäumen. BÜHLER et al. (2007) haben verschiedene Pflanzgruben und Materialien für die Pflanzung von Stadtbäumen in Kopenhagen getestet und dabei eine höhere Vitalität bei sogenannten „super planting pits“ gefunden. Diese wiesen im Wurzelbereich keine lasttragenden Materialien und eine große Pflanzgrube von einer Fläche größer als 12 m³ auf. Es wurde lockeres Material verwendet, welches mindestens 15 m³ durchwurzelbaren Bereich für die Bäume aufwies. Insgesamt zeigten Bäume in Pflanzgruben mit lasttragenden Substraten mit durchwurzelbaren Bereichen ebenfalls ein gutes Wurzelwachstum auf (BÜHLER et al., 2007).

5.2.2 Artenwahl

Die Auswahl der Baumart an einem Standort in der Stadt erfolgt zumeist aus ästhetischen oder räumlichen Gründen. Jedoch zeigen viele der verwendeten Arten aufgrund des spezifischen Stadtklimas (hohe Temperaturen, Streusalz, Hundeurin), des lokalen Klimas (Niederschlagsmengen, Spätfröste) oder eingeführter Schädlinge (Massaria, Asiatischer Laubholzbockkäfer) Vitalitäts- und Wachstumseinbußen (BÖLL et al., 2014; MERTENS et al., 2007; ROLOFF et al., 2008). Beispielsweise kann Streusalz eine Reduktion der Biomasse, Blattchlorose und -nekrose oder sogar das Absterben des gesamten Baumes bedingen (CZERNIAWSKA-KUSZA et al.,

2014). Die Effekte des Klimawandels können diese Probleme verstärken, was einen kompletten Ausfall typischer Stadtbaumarten nach sich ziehen kann (TUBBY und WEBBER, 2010). Klimatisch schwierige Standorte wie Würzburg (hohe Temperaturen, niedrige Niederschlagsmengen, Spätfröste) haben aufgrund dieser Problematik Schwierigkeiten, langfristig geeignete Baumarten für urbane Standorte auszuwählen (BÖLL et al., 2014).

5.2.3 Nachhaltigkeitskonzept

Im Forstbereich reguliert die klassische Nachhaltigkeitsplanung auf der Basis des Normalwaldmodells den stehenden Vorrat, die Entnahmen, Mortalität und Erneuerung in einer Weise, dass ein kontinuierlicher Holzertrag gewährleistet ist (SPEIDEL, 1972). Das Konzept wurde in den zurückliegenden Jahrzehnten dahingehend erweitert, dass auch die Ökosystemdienstleistungen des Waldes nachhaltig gegeben bleiben (MA, 2005; MCPFE, 1993). Für das Management resultieren daraus klare Regeln für die Ernte, Neubegründung und Pflege von Wäldern. Für den Baumbestand einer Stadt existieren zwar teils Karten, Kataster, Bestandsstatistiken oder Modelle für die Quantifizierung von Wirkungen und Leistungen der Bäume. Im mitteleuropäischen Raum fehlen bisher aber Modelle und Pläne für die Nachhaltigkeitsplanung im Sinne einer Gewährleistung nachhaltiger Leistungen und Wirkungen von Stadtbäumen, wie sie z.B. für Melbourne, Australien (CITY OF MELBOURNE, 2012) oder London, England (CITY OF LONDON, 2014) existieren. Wichtigste Komponenten dafür sind der aktuelle Bestand, die Raten des Zuwachses und des Ausscheidens von Bäumen, sowie die Erneuerung durch Ersatz oder Neuanpflanzung. Analog zur Planung im Forstbetrieb könnten solche Modellansätze zeigen, wie ein Stadtbaubestand aufgebaut und gesteuert werden muss (Altersaufbau, Größenverteilung, Baumartenzusammensetzung), um ein gewünschtes Spektrum an Ökosystemdienstleistungen kontinuierlich sicherzustellen und erforderlichenfalls zu erhöhen. Derartige Modellansätze könnten dazu beitragen, Defizite am Baumbestand zu vermeiden, Bedarf an Pflanzmaterial und Personal zu prognostizieren und insbesondere die Ausstattung einer Stadt mit Habitaten, Biodiversität, Beschattung, Kühlung und erholungswirksamen Grün zu sichern und zu entwickeln.

6. FORSCHUNGSPERSPEKTIVEN

6.1 Weiterentwicklung von Modellen

Prozessorientierte Modelle, wie sie für Waldbestände vorliegen, die Wachstum, Ertrag und Umweltdienstleistungen in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen und anderen Umweltfaktoren simulieren, liegen für Stadtbäume nicht vor. Bisherige Modelle basieren zumeist auf empirischen Funktionen, die nur bedingt veränderte Verhältnisse wie etwa die Auswirkungen des Klimawandels berücksichtigen können. Jedoch wären solche physiologischen Modelle vor allem für die Stadtvegetation sehr wichtig, um die Veränderungen des Wachstums und der Dienstleistungen von Stadtbäumen abschätzen zu können, die neben dem Klimawandel

auch von Stadteffekten beeinflusst werden. In einer ersten Version zeigt beispielsweise das neu entwickelte prozessorientierte Modell „CityTree“ (PRETZSCH et al., 2015b) den Einfluss von Klima und kleinräumiger Umgebung auf Wachstum und Umweltleistungen (Kohlenstoffspeicherung, Wasserhaushalt, Abkühlung, Beschattung) von Stadtbäumen wie Linden, Robinien oder Platanen (MACK, 2016; VARGAS, 2016). Solche Modelle können wichtige Instrumente für eine vorausschauende Planung von Stadtgrün und deren Management sein. Für ein nachhaltiges Grünraummanagement ist die Betrachtung auf Einzelbaumbene jedoch nicht ausreichend. Eine exakte und umfangreiche Darstellung des Wachstums und der Leistungen des Baumbestandes ist für ganze Straßenzüge bzw. Stadtteile und letztendlich die gesamte Stadt erforderlich. Hierbei gibt es unterschiedliche Ansätze; während die Software i-Trees verschiedene Aspekte des Baumbestandes beleuchtet (Struktur, Leistungen), kann das Modell ENVI-met (www.envi-met.com) den Einfluss grüner Infrastruktur, Bebauungsdichte u. ä. auf das Mikroklima eines Standortes simulieren. Eine Kopplung dieser Modelle wäre für eine Simulation des Einflusses von Bäumen auf das Stadtklima und die Wirkung des spezifischen Wuchsklimas in der Stadt auf das Baumwachstum sinnvoll.

6.2 Interaktion zwischen Waldbaum- und Stadtbaumforschung

6.2.1 Nachweis von Existenz und Wachstumspotential

In Ländern, deren Wald aus heimischen Arten stark übernutzt, bzw. in Plantagen oder landwirtschaftliche Flächen umgewandelt wurde (z.B. Vietnam, Südafrika, China) wurden Stadtbäume heimischer Arten mitunter verschont (z.B. *Dipterocarpus*, *Podocarpus*, *Metasequoia*). Belassene alte, große Stadtbäume bilden wichtige Anschauungsbeispiele, dass diese Arten dort überhaupt wachsen können, welche Dimensionen sie erreichen, und dass sie als Alternative zu fremdländischen Arten in Frage kommen. Angesichts des Klimawandels werden im urbanen wie forstwirtschaftlichen Sektor neue Arten auf ihre Trockenheitsresistenz und -resilienz erprobt (z.B. *Pinus nigra*, *Castanea sativa*, *Fraxinus ornus*, *Zelkova serrata*). Beide Seiten können hier von einem Austausch der Erfahrungen profitieren.

6.2.2 Messung und Bestandesüberwachung

Die Messung von Waldbäumen folgt einem internationalen Standard, der seit mehreren Jahrhunderten immer weiter verbessert wurde (AVERY und BURKHARDT, 1975; PRODAN, 1951). Gegenwärtig werden in Wäldern große Fortschritte in terrestrischer und flugzeuggetragener Fernerkundung erzielt (Radar, LiDAR, stereometrische Digitalbilder), die sich auch für Stadtbäume eignen (BAYER et al., 2013). Aufgrund ihres Freistandes dürften solitäre Bäume, Straßen- und Parkbäume noch leichter in ihrer Struktur, Vitalität, und Entwicklung über klassische und innovative Verfahren zu erfassen sein.

6.2.3 Wuchsgesetzmäßigkeiten

Stadtbäume repräsentieren Wuchsbedingungen, wie sie im Wald selten auftreten. Sie stehen z.B. oft solitär

und konkurrenzfrei (DAHLHAUSEN et al., 2016; PRETZSCH et al., 2015a), haben wegen des urbanen Wärmeinselseffekts häufig eine verlängerte Vegetationszeit (RÖTZER et al., 2000) und leiden wegen begrenztem Wurzelraum vermehrt unter Trockenstress (MOSER et al., 2016b). Daraus resultierende Reaktionsmuster, wie die maximale laterale Ausdehnung im Freiland, die Wuchsbeschleunigung durch früheres Austreiben und längeres Wachstum im Herbst, oder die Zuwachsreaktion auf Trockenheit, ist von größtem Interesse für die Forstwirtschaft und Wissenschaft. Denn damit repräsentieren Stadtbäume ein Wachstum das unter künftiger Bewirtschaftung oder unter künftigen Wuchsbedingungen auch in Wäldern relevant werden dürfte.

Potentielle Entwicklungen, wie sie in Wäldern allenfalls auf Solitär- oder Nelderversuchen (Versuchsanordnung in konzentrischen Kreisen mit abnehmender Pflanzdichte von innen nach außen) vorkommen, sind im urbanen Raum die Regel und besonders wertvoll für die Parametrisierung von Wuchsmodellen für Wald- und Stadtbäume, weil sie die Grenzwerte von Wachstum und Struktur repräsentieren.

6.2.4 Modelle

Im Unterschied zur Stadtbaumforschung hat die Forstwissenschaft eine lange Tradition in der biometrischen Modellierung von Baumentwicklungen und Simulation der räumlich-zeitlichen Dynamik auf Baum-, Bestandes- und Regionalebene. Bewährte biometrische Modelle (z.B. für die Höhenentwicklung, Kronenallometrie, Wurzelausdehnung) dürften mit großem Nutzen auf die Quantifizierung, Modellierung und Prognose von Stadtbäumen übertragbar sein. Prozessorientierte Modelle können zudem den Einfluss von Umweltveränderungen (z.B. Klima, kleinräumige Umgebung) auf das Wachstum und die Leistungen von Bäumen aufzeigen. Solche für Waldbestände vorhandene Modelle lassen sich für Stadtbäume weiterentwickeln.

6.2.5 Management

Zur nachhaltigen Versorgung mit Holz und anderen Wirkungen und Leistungen des Waldes wurden das Normalwaldmodell und die Nachhaltigkeitsplanung entwickelt, algorithmisch gefasst und der Praxis in Form von Modellen bereitgestellt (SPEIDEL, 1972). Analoge Algorithmen, Modelle und Leitlinien zur Gewährleistung eines nachhaltigen Baumbestandes in einer Stadt und Kontinuität in den Ökosystemdienstleistungen bedürfen noch der Entwicklung; hier könnten Erfahrungen und Methoden aus der Waldforschung und Forstwissenschaft einfließen.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Stadtbäume und grüne Infrastrukturen sind ein wesentlicher Bestandteil des Stadtbildes, sie stellen den ästhetischen und erholungswirksamen Mittelpunkt der Stadt dar. Doch nicht nur durch ihre Ästhetik prägen Bäume eine Stadt, sondern auch durch ihre Struktur und Erscheinung sowie die Funktionen, die sie für das Stadtklima erbringen. Neben positiven Eigenschaften wie Kohlenstoffbindung, Abkühlungswirkung, Beschat-

tung, Biodiversität, sowie Abflussminimierung dürfen jedoch auch die negativen Eigenschaften des Stadtgrüns wie Kosten für die Pflanzung und Pflege, Allergene und Schäden durch herabfallende Pflanzenteile bzw. Verschmutzungen nicht ignoriert werden. Darüber hinaus ist der Wuchsraum der Stadt durch vielfältige Faktoren gekennzeichnet, die sich negativ auf die Vitalität, das Wachstum und die Leistungen der Bäume auswirken und zu erhöhten Kosten für Pflege und Neupflanzungen führen können. Zu nennen sind hierbei hohen Temperaturen, geringe Wuchsraum-, Nährstoff-, und Wasserverfügbarkeit, Schadstoffbelastungen, Beschattung durch Gebäude und Verletzungen. Auch stellen der urbane Wärmeinseleffekt und die Auswirkungen des Klimawandels je nach Wuchsregion für Stadtbäume langfristig wachstumshinderliche Faktoren dar, die in der Grünraumplanung immer mehr im Vordergrund stehen. Städte und Forschung versuchen deshalb, nachhaltige Konzepte zu entwickeln, um weiterhin einen gesunden, vielfältigen und attraktiven Baumbestand in der Stadt zu erhalten. Diese Studie beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand des Wissens und stellt die positiven und negativen Aspekte der Stadtbäume dar. Die Wirkungen von Stadtbäumen auf den Menschen und das Stadtklima, aber auch die Effekte des Standortklimas auf den Baum werden diskutiert. Dabei werden weiterhin die Folgen des Klimawandels aufgezeigt, sowie moderne Konzepte und zukünftige Forschungsperspektiven dargestellt und analysiert.

8. SUMMARY

Title of the paper: *City trees: Growth, functions and services – risks and research prospects.*

Urban trees and green infrastructures are a main element of the cityscape; they are important for aesthetic and recreational purposes. However, not only their aesthetics influence the urban environment but rather their structure and appearance as well as their services for the urban climate. While science focuses mainly on the positive effects of urban trees like carbon storage, cooling, shading, biodiversity and runoff mitigation; negative aspects of urban green such as costs for planting and maintenance, allergenic potential and damages through falling branches further debris need to be mentioned altogether. Moreover, the typical growing site of trees in the city is characterized by numerous factors detrimental for tree growth, vitality and services leading to increased costs for maintenance and replacement. Those are e.g. high temperatures, limited rooting space, water availability and nutrients as well as pollutants, shading by high buildings and injuries. In addition, the urban heat island effect and climate change can further amplify the negative effects of the urban environment on the growth of urban trees. Therefore these interactions are gaining increased attention of urban planners. City councils and science try to develop sustainable planting concepts and management plans to preserve a vital, diverse, attractive urban tree forests. This review discusses the current state of knowledge and highlights the positive and negative aspects of urban trees. The impacts of urban trees on city dwellers and the urban

climate as well as the effects of the growing site on tree vitality are presented. The effects of climate change on tree growth are analyzed and modern concepts and research prospects discussed.

9. RÉSUMÉ

Titre de l'article: *Arbres de villes: croissance, fonctions et performances – Risques et perspectives de recherche.*

Arbres de ville et infrastructures vertes sont des éléments essentiels de l'image d'une ville: ils représentent le cœur esthétique et de détente de la ville. Cependant les arbres ne marquent une ville pas uniquement par leur esthétique ni par leur structure et leur apparence mais aussi par leurs fonctions qui servent au climat de la ville. A côté de propriétés positives comme la fixation du carbone, les effets de refroidissement, l'ombrage, la biodiversité, et le caractère minime des rejets, les propriétés négatives de la verdure de la ville ne doivent pas être ignorées: coûts pour la plantation et l'entretien, substances allergènes et dégâts par la chute de rameaux ou les salissures. Par ailleurs, l'espace racinaire des arbres offert par la ville offert est caractérisé par des facteurs divers qui s'expriment négativement sur la vitalité, la croissance et les performances des arbres et peuvent conduire à des coûts surélevés pour les soins et de nouvelles plantations. On nommera ici les températures élevées, la faible disponibilité d'espace de croissance, d'éléments nutritifs, d'eau, la charge des émissions polluantes, l'ombrage subi par les immeubles et les blessures. Egalement l'effet d'îlot de chaleur et les manifestations du changement climatique présentent, par région de croissance pour les arbres de ville, des facteurs inhibant la croissance à long terme qui sont toujours plus présents en arrière-plan dans la planification des espaces verts. De ce fait, villes et recherche essaient de développer ensemble des concepts de pérennité pour maintenir, malgré tout, un peuplement d'arbres de villes saint, diversifié et attractif. Cette étude se concentre sur l'état actuel des connaissances et présente les aspects positifs et négatifs des arbres de ville. On y discute les impacts des arbres de ville sur les humains et sur le climat de la ville, mais aussi les effets du climat local sur l'arbre. Les répercussions du changement climatique sont démontrées de même que les concepts et perspectives futures de recherche présentées et analysées.

8. LITERATUR

- AGUARON, E. and E. G. MCPHERSON (2012): Comparison of methods for estimating carbon dioxide storage by Sacramento's urban forest. In: LAL, R., AUGUSTIN, B. (Eds.), Carbon Sequestration in Urban Ecosystems. Springer, New York, pp. 43–71.
- AKBARI, H., M. POMERANTZ and H. TAHA (2001): Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Sol Energy* **70**, p. 295–310.
- ALLEN, C. D., A. K. MACALADY, H. CHENCHOUNI, D. BACHELET, N. MCDOWELL, M. VENNETIER, T. KITZBERGER, A. RIGLING, D. D. BRESHEARS, E. H. HOGG, P. GONZALEZ, R. FENSHAM, Z. ZHANG, J. CASTRO, N. DEMIDOVA, J.-H. LIM, G. ALLARD, S. W. RUNNING, A. SEMERCI and N. COBB (2010): A global overview of drought and heat-induced

- tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For Ecol Manage* **259**, p. 660–684.
- ARMSON, D., M. A. RAHMAN and A. R. ENNOS (2013a): A Comparison of the Shading Effectiveness of Five Different Street Tree Species in Manchester, UK. *Arboric Urban For* **39**, p. 157–164.
- ARMSON, D., P. STRINGER and A. R. ENNOS (2012): The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area. *Urban For Urban Greening* **11**, p. 245–255.
- ARMSON, D., P. STRINGER and A. R. ENNOS (2013b): The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK. *Urban For Urban Greening* **12**, p. 282–286.
- AVERY, T. E. and H. E. BURKHARDT (1975): *Forest Measurements*. McGraw-Hill Inc, New York
- AYLOR, D. E. (1972): Noise reduction by vegetation and ground. *J Acoust Soc Am* **51**, p. 197–205.
- BARTENS, J., H. D. GRISSINO-MAYER, S. D. DAY and P. E. WISEMAN (2012): Evaluating the potential for dendrochronological analysis of live oak (*Quercus virginiana* Mill.) from the urban and rural environment – An explorative study. *Dendrochronologia* **30**, p. 15–21.
- BAYER, D., S. SEIFERT and H. PRETZSCH (2013): Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.] in mixed cersus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. *Trees* **27**, p. 1035–1047.
- BECKETT, K. P., P. H. FREER-SMITH and G. TAYLOR (2000): The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal* **24**, p. 1–21.
- BELL, M. L., R. D. MORGENSTERN and W. HARRINGTON (2011): Quantifying the human health benefits of air pollution policies: review of recent studies and new directions in accountability research. *Environ Sci Policy* **14**, p. 357–368.
- BÖLL, S., P. SCHÖNFELD, K. KÖRBER und J.V. HERRMANN (2014): Stadtbäume unter Stress. Projekt „Stadtgrün 2021“ untersucht Stadtbäume im Zeichen des Klimawandels. *LWF aktuell* **98**, S. 4–8.
- BOLUND, P. and S. HUNHAMMAR (1999): Ecosystem services in urban areas. *Ecol Econ* **29**, p. 293–301.
- BOWLER, D. E., L. BUYUNG-ALI, T. M. KNIGHT and A. S. PULLIN (2010): Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landsc Urban Plan* **97**, p. 147–155.
- BRASSEUR, G. P. and R. B. CHATFIELD (1991): The fate of biogenic trace gases in the atmosphere. *In: SHARKEY, T. D., HOLLAND, E. A., MOONEY, H. A. (Eds.), Trace Gas Emissions by Plants*. Academic Press, New York, pp. 1–27.
- BÜHLER, O., P. KRISTOFFERSEN and S. U. LARSEN (2007): Growth of Street Trees in Copenhagen With Emphasis on the Effect of Different Establishment Concepts. *Arboric Urban For* **5**, p. 330–337.
- CALFAPIETRA, C., S. FARES, F. MANES, A. MORANI, G. SGRIGNA and F. LORETO (2013): Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities: A review. *Environ Pollut* **183**, p. 71–80.
- CARINANOS, P. and M. CASARES-PORCEL (2011): Urban green zones and related pollen allergy: A review. Some guidelines for designing spaces with low allergy impact. *Landsc Urban Plan* **101**, p. 205–214.
- CARINANOS, P., M. CASARES-PORCEL and J.-M. QUESADA-RUBIO (2014): Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landsc Urban Plan* **123**, p. 134–144.
- CAVANAGH, J.-A. E., P. ZAWAR-REZA and J. G. WILSON (2009): Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch. *Urban Forestry & Urban Greening* **8**, p. 21–30.
- CEKSTERE, G., O. NIKODEMUS and A. OSVALDE (2008): Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga, Latvia. *Urban For Urban Greening* **7**, p. 207–217.
- CITY OF LONDON (2014): *City of London Urban Forest Strategy. Enhancing The Forest City*.
- CITY OF MELBOURNE (2012): *Urban forestry strategy. Making a great city greener 2012–2032*.
- COBURN, J. (2009): Cities, Climate Change and Urban Heat Island Mitigation: Localising Global Environmental Science. *Urban Studies* **46**, p. 413–427.
- COLLIER, C. G. (2006): The impact of urban areas on weather. *Q J R Meteorol Soc* **132**, 1–25.
- COOK, D. I. (1978): Trees, solid barriers, and combinations: Alternatives for noise control. *In: HOPKINS, G. (Ed.), Proceedings of the National Urban Forestry Conference*. SUNY College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, NY, pp. 330–339.
- COOK, D. I. and D. F. VAN HAVERBEKE (1971): Trees and shrubs for noise abatement, Res. Bull. Nebraska Agricultural Experiment Station, Lincoln.
- CZERNIAWSKA-KUSZA, I., G. KUSZA and M. DUZYNSKI (2014): Effect of Deicing Salts on Urban Soils and Health Status of Roadside Trees in the Opole Region. *Environ Toxicol* **19**, p. 296–301.
- D'AMATO, G., L. CECCHI, S. BONINI, C. NUNES, I. ANNESI-MAESANO, H. BEHRENDT, G. LICCARDI, T. POPOV and P. VAN CAUWENBERGE (2007): Allergenic pollen and pollen allergy in Europe. *Allergy*.
- DAHLHAUSEN, J., P. BIBER, T. RÖTZER, E. UHL and H. PRETZSCH (2016): Tree Species and Their Space Requirements in Six Urban Environments Worldwide. *Forests* **7**, 19 p.
- DALE, V. H., L. A. JOYCE, S. McNULTY, R. P. NEILSON, M. P. AYRES, M. D. FLANNIGAN, P. J. HANSON, L. C. IRLAND, A. E. LUGO, C. J. PETERSON, D. SIMBERLOFF, F. J. SWANSON, B. J. STOCKS and B. M. WOTTON (2001): Climate Change and Forest Disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. *BioScience* **51**, p. 723–734.
- DAVIES, Z. G., J. L. EDMONDSON, A. HEINEMEYER, J. R. LEAKE and K. J. GASTON (2011): Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a citywide scale. *J Appl Ecol* **48**, p. 1125–1134.
- DAY, S. D., N. L. BASSUK and H. van Es (1995): Effects of four compaction remediation methods for landscape trees on soil aeration, mechanical impedance and tree establishment. *J Arboric* **22**, p. 144–150.
- DAY, S. D., P. E. WISEMAN, S. B. DICKINSON and J. R. HARRIS (2010): Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees. *Arboric Urban For* **4**, p. 149–157.
- DE GROOT, R. S., M. A. WILSON and R. M. J. BOUMANS (2002): A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* **41**, p. 393–408.
- DEFRA (2012): *UK Climate Change Risk Assessment. Water Summary*. Department for Environment, Food

- and Rural Affairs, www.defra.gov.uk/environment/climate/government/risk-assessment/#report.
- DELLA-MARTA, P. M., M. R. HAYLOCK, J. LUTERBACHER and H. WANNER (2007): Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *J Geophys Res Atmos* **112**.
- DICKIE, I. A., B. M. BENNETT, L. E. BURROWS, M. A. NUNÑEZ, D. A. PELTZER, A. PORTÉ, D. M. RICHARDSON, M. REJMÁNEK, P. W. RUNDEL and B. W. VAN WILGEN (2014): Conflicting values: ecosystem services and invasive tree management. *Biol Invasions* **16**, p. 705–719.
- DOBBS, C., F. J. ESCOBEDO and W. C. ZIPPERER (2011): A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators. *Landsc Urban Plan* **99**, p. 196–206.
- DOBBS, C., D. KENDAL and C. R. NITSCHKE (2014): Multiple ecosystem services and disservices of the urban forest establishing their connections with landscape structure and sociodemographics. *Ecol Indic* **43**, p. 44–55.
- DOMM, J., R. DREW, A. GREENE, E. RIPLEY, R. SMARDON and J. TORDESILLAS (2008): Recommended urban forest mixtures to optimize selected environmental benefits. *EnviroNews: International Society of Environmental Botanists* **14**, p. 7–10.
- DÖRKEN, V. M. and H. STEINECKE (2017): *Tilia cordata* – Winter-Linde (Malvaceae), Baum des Jahres 2016, und weitere Linden. *Jahrb. Bochumer Bot. Ver.* **8**, p. 306–318.
- DWYER, J. F., E. G. MCPHERSON, H. W. SCHROEDER and R. A. ROWNTREE (1992): Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Journal for Arboriculture* **18**.
- ENNOS, A. R., D. ARMSON and M. A. RAHMAN (2014): Trees, people and the built environment II, TPBEII Proceedings: A Milestone for Research on Urban Trees and Green Infrastructure.
- ESCOBEDO, F. J., T. KROEGER and J. E. WAGNER (2011): Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environ Pollut* **159**, p. 2078–2087.
- ESCOBEDO, F. J. and D. J. NOWAK (2009): Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest. *Landsc Urban Plan* **90**, p. 102–110.
- ESCOBEDO, F. J., J. E. WAGNER, D. J. NOWAK, C. L. DE LA MAZA, M. RODRIGUEZ and D. E. CRANE (2008): Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management* **86**, p. 148–157.
- FORASTER, M., A. DELTELL, X. BASAGAÑA, M. MEDINARAMÓN, I. AGUILERA, L. BOUSO, M. GRAU, H. C. PHULERIA, M. RIVERA, R. SLAMA, J. SUNYER, J. TARGA and N. KÜNZLI (2011): Local determinants of road traffic noise levels versus determinants of air pollution levels in a Mediterranean city. *Environmental Research* **111**, p. 177–183.
- FOSTER, J., A. LOWE and S. WINKELMAN (2011): The value of green infrastructure for urban climate adaptation. Center for Clean Air Policy, Washington, D.C., USA.
- FULLER, R. A., K. N. IRVINE, P. DEVINE-WRIGHT, P. H. WARREN and K. J. GASTON (2007): Physiological benefits of greenspace increase with biodiversity *Biol Lett* **3**, p. 390–394.
- GAIDA, W. and H. GROTHE (2000): *Gehölze – Handbuch für Planung und Ausführung*. Patzer, Berlin/Hannover
- GALK e.V. (2016): GALK Straßenbaumliste. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz.
- GAN, W. Q., L. TAMBURIC, H. W. DAVIES, P. A. DEMERS, M. KOEHOORN and M. BRAUER (2010): Changes in Residential Proximity to Road Traffic and the Risk of Death From Coronary Heart Disease. *Epidemiol* **21**, p. 642–649.
- GEORGE, K., L. H. ZISKA, J. A. BUNCE and B. QUEBEDEAUX (2007): Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban–rural transect. *Atmos. Environ* **41**, p. 7654–7665.
- GEORGI, J. N. and D. DIMITRIOU (2010): The contribution of urban green spaces to the improvement of environment in cities: Case study of Chania, Greece. *Build Environ* **45**, p. 1401–1414.
- GILL, S., J. HANDLEY, R. ENNOS and S. PAULEIT (2007): Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure. *Build Environ* **33**, p. 115–133.
- GILL, S. E., M. A. RAHMAN, J. F. HANDLEY and A. R. ENNOS (2013): Modelling water stress to urban amenity grass in Manchester UK under climate change and its potential impacts in reducing urban cooling. *Urban For Urban Greening* **12**, p. 350–358.
- GILLNER, S., A. BRÄUNING and A. ROLOFF (2014): Dendrochronological analysis of urban trees: climatic response and impact of drought on frequently used tree species. *Trees* **28**, p. 1079–1093.
- GILMAN, E. (2007): Florida Trees for Urban and Suburban Sites: Florida Yard and Neighborhoods. IFAS Extension, University of Florida.
- GÓMEZ-BAGGETHUN, E. and D. N. BARTON (2013): Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics* **86**, p. 235–245.
- GÓMEZ-MUÑOZ, V. M., M. A. PORTA-GÁNDARA and J. L. FERNÁNDEZ (2010): Effect of tree shades in urban planning in hot-arid climatic regions. *Landsc Urban Plan* **94**, p. 149–157.
- GONG, P., S. LIANG, E. J. CARLTON, Q. JIANG, J. WU, L. WANG and J. V. REMAIS (2012): Urbanisation and health in China. *Lancet* **379**, p. 843–852.
- GRABOSKY, J. and N. L. BASSUK (1995): A new urban tree soil to safely increase rooting volumes under sidewalks. *J Arboric* **21**, p. 187–201.
- GREEN, R. J. and G. DAVIS (2005): The burden of allergic rhinitis. *Curr Allergy Clin Im* **18**, p. 176–178.
- GREGG, J. W., C. G. JONES and T. E. DAWSON (2003): Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature* **424**, p. 183–187.
- GROTE, R. (2009): Welche Rolle spielen Kohlenwasserstoff-Emissionen aus Wäldern für die Forstwirtschaft der Zukunft? *AFJZ* **181**, p. 77–81.
- GROTE, R., R. K. MONSON and Ü. NIINEMETS (2013): Leaf-Level Models of Constitutive and Stress-Driven Volatile Organic Compound Emissions, in: Niinemets, Ü., Monson, R.K. (Eds.), *Biology, Controls and Models of Tree Volatile Organic Compound Emissions*, pp. 315–355.
- GUENTHER, A., P. ZIMMERMAN and W. WILDERMUTH (1994): Natural volatile organic compound emission rate estimates for US woodland landscapes. *Atmos Environ* **28**, p. 1197–1210.
- HANSEN, R., D. BORN, K. LINDSCHULTE, W. ROLF, R. BARTZ, A. SCHRÖDER, C. W. BECKER, I. KOWARIK and S. PAULEIT (2017): Grüne Infrastruktur im urbanen Raum: Grundlagen, Planung und Umsetzung in der integrierten Stadtentwicklung. In *Bearbeitung, Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben FKZ 3515820800*. Bundesamt für Naturschutz-Bonn Bad Godesberg.
- HASENAUER, H. (1997): Dimensional relationship of open-grown trees in Austria. *For Ecol Manage* **96**, p. 197–206.

- HAUGHTON, G. and H. HUNTER (1994): Sustainable Cities, Regional Policy and Development. Jessica Kingsley, London
- HONOLD, M. A. (2016): Auswirkung von Stadtbäumen auf den Feinstaubgehalt in München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde. TU München.
- HRUSKA, K. (2003): Assessment of urban allergophytes using and allergen index. *Aerobiologia* **19**, p. 107–111.
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. IPCC Working Group I Contribution to AR5.
- JARUP, L., W. BABISCH, D. HOUTHULJS, G. PERSHAGEN, K. KATSOUYANNI, E. CADUM, M. L. DUDLEY, P. SAVIGNY, I. SEIFFERT, W. SWART, O. BREUGELMANS, G. BLUHM, J. SELANDER, A. HARALABIDIS, K. DIMAKOPOUJOU, P. SOUTZI, M. VELONAKIS and F. VIGNA-TAGLIANTI (2008): Hypertension and exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environ Health Perspect* **116**, p. 329–333.
- JIM, C. Y. and W. Y. CHEN (2008): Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management* **88**, p. 665–676.
- KLEIN, D. and C. SCHULZ (2012). Die Kohlenstoffbilanz der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft, in: Forstwirtschaft, B.L.f.W.u. (Ed.), Abschlussbericht 09/2012.
- KONARSKA, K., J. UDDLING, B. HOLMER, M. LUTZ, F. LINDBERG, H. PLEJEL and S. THORSSON (2015): Transpiration of urban trees and its cooling effect in a high latitude city. *Int J Biometeor* **6**, p. 159–172.
- KREMER, B. P. (1998): Die Bäume Mitteleuropas: Welches Blatt ist das? Franckh-Kosmos Verlag
- KRÜSSMANN, G. (1970): Taschenbuch der Gehölzverwendung. Parey, Berlin/Hamburg
- KÜHN, I., R. BRANDL and S. KLOTZ (2004): The flora of German cities is naturally species rich. *Evolutionary Ecology Research* **6**, p. 749–764.
- KUTTNER, W. (2004): Stadtklima., Teil 1: Grundzüge und Ursachen. Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie **16**, p. 187–199.
- LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN, BAUREFERAT GARTENBAU (2016): ZTV-Vegtra Mü. 5.
- LARSEN, F. K. and P. KRISTOFFERSEN (2002): *Tilia*'s physical dimensions over time. *J Arboric* **28**, p. 209–214.
- LEUZINGER, S., R. VOGT and C. KÖRNER (2010): Tree surface temperature in an urban environment. *Agr Forest Meteorol* **150**, p. 56–62.
- LIN, B. S. and Y. J. LIN (2010): Cooling Effect of Shade Trees with Different Characteristics in a Subtropical Urban Park. *Hortscience* **45**, p. 83–86.
- LINDNER, M., M. MAROSCHEK, S. NETHERER, A. KREMER, A. BARBATI, J. GARCIA-GONZALO, R. SEIDL, S. DELZON, P. CORONA, M. KOLSTRÖM, M. J. LEXER and M. MARCHETTI (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For Ecol Manage* **259**, p. 698–709.
- LIPPEVERBAND (2013): Future Cities. The future cities guide.
- LIU, C. and X. LI (2012): Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China. *Urban For Urban Greening* **11**, p. 121–128.
- LOHR, V. I., C. H. PEARSON-MIMS, J. TARNAI, D. A. DILLMAN (2004): How urban residents rate and rank the benefits and problems associated with trees in cities. *J Arboric* **30**, p. 28–35.
- LUBER, G. and M. MCGEEHIN (2008): Climate Change and Extreme Heat Events. *American Journal of Preventive Medicine* **35**, p. 429–435.
- LUKASZKIEWICZ, J. and M. KOSMALA (2008): Determining the Age of Streetside Trees with Diameter at Breast Height-based Multifactorial Model. *Arboric Urban For* **34**, p. 137–143.
- LUKASZKIEWICZ, J., M. KOSMALA, M. CHRAPKA and J. BOROWSKI (2005): Determining the age of streetside *Tilia cordata* trees with a dbh-based model. *J Arboric* **31**, p. 280–284.
- LYYTIMÄKI, J. and M. SIPILÄ (2009): Hopping on one leg – the challenge of ecosystem disservices for urban green management. *Urban For Urban Greening* **8**, p. 309–315.
- MA (2005): Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis, Washington, DC.
- MACK, J. (2016): Field measurements of the cooling effect of *Tilia cordata* and *Robinia pseudoacacia* in Bayreuth, Germany using low-cost-devices, Technische Universität München, Universität Bayreuth.
- MACO, S. E., E. G. MCPHERSON, J. R. SIMPSON, P. J. PEPER and Q. XIAO (2003): City of San Francisco, California Street Tree Resource Analysis. CUFR-3, Center for Urban Forest Research, Pacific Southwest Research Station, United States Forest Service, Davies.
- MATZARAKIS, A. and B. AMELUNG (2008): Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. In: THOMSON, M. C., GARCIA-HERRERA, R., BENISTON, M. (Eds.), Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health. Springer Netherlands, pp. 161–172.
- MCDONALD, A. G., W. J. BEALEY, D. FOWLER, U. DRAGOSITS, U. SKIBA, R. SMITH, R. G. DONOVAN, H. E. BRETT, C. N. HEWITT and E. NEMITZ (2007): Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations. *Atmos Environ* **41**, p. 8455–8467.
- MCHALE, M. R., I. C. BURKE, M. A. LEFSKY, P. J. PEPER and E. G. MCPHERSON (2009): Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? *Urban Ecosyst* **12**, p. 95–113.
- MCPFE (1993): Resolution H1: General guidelines for the sustainable management of forests in Europe, Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe, Helsinki, Finland, p. 5.
- MCPHERSON, E. G. (1998): Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *J Arboric* **24**, p. 215–223.
- MCPHERSON, E. G., D. J. NOWAK, G. HEISLER, S. GRIMMOND, C. SOUCH, R. GRANT and R. A. ROWNTREE (1997): Quantifying urban forest structure, function, and value: the Chicago Urban Forest Climate Project. *Urban Ecosyst* **1**, p. 49–61.
- MCPHERSON, E. G., D. J. NOWAK and R. A. ROWNTREE (1994): Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project, General Technical Report NE-186. US Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Radnor, PA.
- MCPHERSON, E. G. and P. J. PEPER (2012): Urban tree growth modeling. *Arboric Urban For* **38**, p. 172–180.
- MCPHERSON, E. G., K. I. SCOTT and J. R. SIMPSON (1998): Estimating cost effectiveness of residential yard trees for improving air quality in Sacramento, California, using existing models. *Atmos Environ* **32**, p. 75–84.

- MEJIA, A. I. and G. E. MOGLEN (2010): Impact of the spatial distribution of imperviousness on the hydrologic response of an urbanizing basin. *Hydrological Processes* **24**, p. 3359–3373.
- MERTENS, J., L. VAN NEVEL, A. DE SCHRIJVER, F. PISSCHAERT, A. OOSTERBAAN, F. M. G. TACK and K. VERHEYEN (2007): Tree species effect on the redistribution of soil metals. *Environ Pollut* **149**, p. 173–181.
- MOLL, C. W. (1989): The state of our urban forest. *Am Forests* **95**, p. 61–64.
- MORGENROTH, J. and G. D. BUCHAN (2009): Soil moisture and aeration beneath pervious and impervious pavements. *Arboric Urban For* **35**, p. 135–141.
- MOSER, A., M. A. RAHMAN, H. PRETZSCH, S. PAULEIT and T. RÖTZER (2016a): Inter- and intraannual growth patterns of urban small-leaved lime (*Tilia cordata* mill.) at two public squares with contrasting microclimatic conditions. *Int J Biometeorol* **61**, p. 1095–1107.
- MOSER, A., T. RÖTZER, S. PAULEIT and H. PRETZSCH (2015): Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments. *Urban For Urban Greening* **14**, p. 1110–1121.
- MOSER, A., T. RÖTZER, S. PAULEIT and H. PRETZSCH (2016b): The urban environment can modify drought stress of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Forests* **7**, p. 71.
- MOSER, A., E. UHL, T. RÖTZER, P. BIBER, J. DAHLHAUSEN, B. LEFER and H. PRETZSCH (2017): Effects of Climate and the Urban Heat Island Effect on Urban Tree Growth in Houston. *Open Journal of Forestry*, akzeptiert.
- NOWAK, D. J. and D. E. CRANE (2002): Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environ Pollut* **116**, p. 381–389.
- NOWAK, D. J., D. E. CRANE and J. C. STEVENS (2006): Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban For Urban Greening* **4**, p. 115–123.
- NOWAK, D. J., D. E. CRANE, J. C. STEVENS, R. E. HOEHN and J. T. WALTON (2008): A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Arboric Urban For* **34**, p. 347–358.
- NOWAK, D. J. and J. F. DWYER (2000): Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. *In: KUSER, J. (Ed.)*, Handbook of Urban and Community Forestry in the Northeast. Plenum Publishers, New York, p. 11e25.
- NOWAK, D. J. and J. F. DWYER (2007): Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. *In: KUSER, J. E. (Ed.)*, Urban and Community Forestry in the Northeast. Springer.
- NOWAK, D. J., R. E. HOEHN, D. E. CRANE, J. C. STEVENS and T. JEFFREY (2007): Assessing Urban Forest Effects and Values: San Francisco's Urban Forest. *In: Forest Service, N.R.S. (Ed.)*, Resour. Bull. NRS-8, p. 22 p.
- NOWAK, D. J., E. G. MCPHERSON and R. A. ROWNTREE (1994): Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep **186**.
- OKE, T. (1982): The energetic basis of the urban heat island. *Q J R Meteorol Soc* **108**, p. 1–24.
- OSSENBRÜGGE, J. and B. BECHTEL (2010): Klimawandel und Stadt: Der Faktor Klima als Determinante der Stadtentwicklung. *Hamburger Symposium Geographie Band 2*.
- PAULEIT, S. and F. DUHME (2000): GIS assessment of Munich's urban forest structure for urban planning. *J Arboric* **23**, p. 133–141.
- PAULEIT, S., L. LIU, J. AHERN and A. KAZMIERCZAK (2011): Multifunctional green infrastructure planning to promote ecological services in the city. *In: NIEMELÄ, J. (Ed.)*, Handbook of Urban Ecology. Oxford University Press, Oxford, pp. 272–285.
- PAWANKAR, R., G. W. CANONICA, S. T. HOLTGATE and R. F. LOCKEY (2011): WAO whitebook on allergy 2011–2012: Executive summary. Milwaukee, WI: World Allergy Organization.
- PEPER, P. J., C. P. ALZATE, J. W. MCNEIL and J. HASHEMI (2014): Allometric equations for urban ash trees (*Fraxinus* spp.) in Oakville, Southern Ontario, Canada. *Urban For Urban Greening* **13**, p. 175–183.
- PEPER, P. J., E. G. MCPHERSON and S. MORI (2001a): Equations for predicting diameter, height, crown width, and leaf area of San Joaquin Valley street trees. *J Arboric* **27**, p. 306–317.
- PEPER, P. J., E. G. MCPHERSON and S. M. MORI (2001b): Predictive equations for dimensions and leaf area of coastal Southern California street trees. *J Arboric* **27**, p. 169–180.
- PETERSEN, A. and D. ECKSTEIN (1988): Roadside trees in Hamburg-their present situation of environmental stress and their future chance for recovery. *Arboric. J.* **12**, p. 109–117.
- PONGRACZ, R., J. BARTHOLY and Z. DEZSOE (2010): Application of remotely sensed thermal information to urban climatology of Central European cities. *Physics and Chemistry of the Earth* **35**, p. 95–99.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, G. SCHÜTZE, E. UHL and T. RÖTZER (2014): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nat. Commun* **5** (suppl. 1), 4967.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, E. UHL, J. DAHLHAUSEN, T. RÖTZER, J. CALDENTY, T. KOIKE, T. VAN CON, A. CHAVANNE, T. SEIFERT, B. DU TOIT, C. FARNDEN and S. PAULEIT (2015a): Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban For Urban Greening* **14**, p. 466–479.
- PRETZSCH, H., P. BIBER, E. UHL, J. DAHLHAUSEN, G. SCHÜTZE, D. PERKINS, T. RÖTZER, J. CALDENTY, T. KOIKE, T. VAN CON, B. DU TOIT, K. FOSTER and B. LEFER (2017): Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. *Science Advances*, akzeptiert.
- PRETZSCH, H., T. RÖTZER, S. PAULEIT and A. MOSER (2015b): Stadtbäume im Klimawandel Wuchsverhalten, Umweltleistungen und Perspektiven. *Schlussbericht mit Leitfaden*.
- PRODAN, M. (1951): Messung der Waldbestände. JD Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main
- RADOGLOU, K., D. DOBROWOLSKA, G. SPYROGLOU and V.-N. NICOLESCU (2009): A review on the ecology and silviculture of limes (*Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop. and *Tilia tormentosa* Moench.) in Europe. *Die Bodenkultur* **60**, p. 9–19.
- RAHMAN, M. A., D. ARMSON and A. R. ENNOS (2015): A comparison of the growth and cooling effectiveness of five commonly planted urban tree species. *Urban Ecosyst* **18**, p. 371–389.
- RAHMAN, M. A., A. MOSER, T. RÖTZER and S. PAULEIT (2017a): Below-canopy surface and air cooling effect of two contrasting tree species in urban street conditions. *Landsc Urban Plan, In Begutachtung*.

- RAHMAN, M. A., A. MOSER, T. RÖTZER and S. PAULEIT (2017b): Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agric For Meteorol* **232**, p. 443–456.
- RAHMAN, M. A., J. G. SMITH, P. STRINGER and A. R. ENNOS (2011): Effect of rooting conditions on the growth and cooling ability of *Pyrus calleryana*. *Urban For Urban Greening* **10**, p. 185–192.
- RAHMAN, M. A., P. STRINGER and A. R. ENNOS (2013): Effect of Pit Design and Soil Composition on Performance of *Pyrus calleryana* Street Trees in the Establishment Period. *Arboric Urban For* **39**, p. 256–266.
- REED, S. D., T. A. LEE and D. C. MCCRORY (2004): The economic burden of allergic rhinitis: A critical evaluation of the literature. *Pharmacoeconomics* **22**, p. 345–361.
- RIJAL, B., A. R. WEISKITTEL and J. A. KERSHAW (2012): Development of height to crown base models for thirteen tree species of the North American Acadian Region. *For Chron* **88**, p. 60–73.
- ROLOFF, A. (2013): Bäume in der Stadt. Ulmer, Stuttgart
- ROLOFF, A. (2017): Invasive Baumarten in der Stadt – Risiken, Potenziale und Management. In: DUJESIEFKEN, D. (Ed.), *Deutsche Baumpflegetage*, Augsburg.
- ROLOFF, A. and A. BÄRTELS (2008): *Flora der Gehölze – Bestimmung, Eigenschaften, Verwendung*. Ulmer, Stuttgart
- ROLOFF, A., S. GILLNER and S. BONN (2008): Gehölzartenwahl im urbanen Raum unter dem Aspekt des Klimawandels. *Sonderheft Grün ist Leben*, p. 30–42.
- ROSENFELD, A. H., J. J. ROMM, H. AKBARI and M. POMERANTZ (1998): Cool communities: strategies for heat islands mitigation and smog reduction. *Energy and Buildings* **28**, p. 51–62.
- ROSS, Z., I. KHEIRBEK, J. E. CLOUGHERTY, K. ITO, T. MATTE, S. MARKOWITZ and H. EISL (2011): Noise, air pollutants and traffic: Continuous measurement and correlation at a high-traffic location in New York City. *Environmental Research* **111**, p. 1054–1063.
- RÖTZER, T., Y. LIAO, K. GÖRGEN, G. SCHÜLER and H. PRETZSCH (2013): Modelling the impact of climate change on the productivity and water-use efficiency of a central European beech forest. *Clim Res* **58**, p. 81–95.
- RÖTZER, T., M. WITTENZELLER, H. HÄCKEL and J. NEKOVAR (2000): Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *Int J Biometeorol* **44**, p. 60–66.
- ROY, S., J. A. BYRNE and C. PICKERING (2012): A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban For Urban Greening* **11**, p. 351–363.
- RUST, S. (2014) Analysis of regional variation of height growth and slenderness in populations of six urban tree species using a quantile regression approach. *Urban For Urban Greening* **13**, p. 336–343.
- SÆBØ, A., R. POPEK, B. NAWROT, H. M. HANSLIN, H. GAWRONSKA and S. W. GAWRONSKI (2012): Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment* p. 427–428, p. 347–354.
- SAKKA, A., M. SANTAMOURIS, I. LIVADA, F. NICOLS and M. WILSON (2012): On the thermal performance of low income housing during heat waves. *Energy Build* **49**, p. 69–77.
- SANDER, H., S. POLASKY and R. G. HAIGHT (2010): The value of urban tree cover: A hedonic property price model in Ramsey and Dakota Counties, Minnesota, USA. *Ecological Economics* **69**, p. 1646–1656.
- SANDERS, J., J. GRABOSKY and P. COWIE (2013): Establishing maximum size expectations for urban trees with regard to designed space. *Arboric Urban For* **39**, p. 68–73.
- SANDERS, J. R. and J. C. GRABOSKY (2014): 20 years later: Does reduced soil area change overall tree growth? *Urban For Urban Greening* **13**, p. 295–303.
- SANTAMOURIS, M., N. PAPANIKOLAOU, I. LIVADA, I. KORONAKIS, C. GEORGAKIS, A. ARGIRIOU and D. N. ASSIMAKOPOULOS (2001): On the impact of urban climate to the energy consumption of buildings. *Sol Energy* **70**, p. 201–216.
- SAVI, T., S. BERTUZZI, S. BRANCA, M. TRETACH and A. NARDINI (2015): Drought-induced xylem cavitation and hydraulic deterioration: risk factors for urban trees under climate change? *The New phytologist* **205**, p. 1106–1116.
- SCALENGHE, R. and F. A. MARSAN (2008): The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landsc Urban Plan* **90**, p. 1–10.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1996): *Tree rings and environment*. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf
- SEMENZATO, P., D. CATTANEO and M. DAINESE (2011): Growth prediction for five tree species in an Italian urban forest. *Urban For Urban Greening* **10**, p. 169–176.
- SHAHIDAN, M. F., M. K. M. SHARIFF, P. JONES, E. SALLEH and A. M. ABDULLAH (2010): A comparison of *Mesua ferrea* L. and *Hura crepitans* L. for shade creation and radiation modification in improving thermal comfort. *Landsc Urban Plan* **97**, p. 168–181.
- SHARKEY, T. D. and E. L. SINGSAAS (1995): Why plants emit isoprene. *Nature* **374**, p. 769.
- SHASHUA-BAR, L. and M. E. HOFFMAN (2003): Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy Build* **35**, p. 61–68.
- SOARES, A. L., F. C. REGO, E. G. MCPHERSON, J. R. SIMPSON, P. J. PEPPER and Q. XIAO (2011): Benefits and costs of street trees in Lisbon, Portugal. *Urban For Urban Greening* **10**, p. 69–78.
- SOMMER, N. (2007): *Gehölzsortimente und ihre Verwendung*. Österr. Agrarverlag, Wien
- SPEIDEL, G. (1972): *Planung im Forstbetrieb*. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin
- STADT BERLIN (2016): *Neue Stadtbäume für Berlins Straßen*.
- STADT WÜRZBURG (2014): *Stellplatzsatzung der Stadt Würzburg (SPS). Stellplatzsatzung vom 25. März 2014 (MP und VBl Nr. 73/2014 vom 28. März 2014)*.
- STOFFBERG, G. H., M. W. VAN ROOYEN, M. J. VAN DER LINDE and H. T. GROENEVELD (2008): Predicting the growth in tree height and crown size of three street tree species in the City of Tshwane, South Africa. *Urban For Urban Greening* **7**, p. 259–264.
- STOLT, E. (1982): *Vegetationens förmåga att minska expositionen för bilavgaser (The ability of vegetation in decreasing exposure to car fumes)*, Naturvårdsverkets rapport 4779, Stockholm.
- STROHBACH, M. W. and D. HAASE (2012): Estimating the carbon stock of a city, a study from Leipzig, Germany. *Landsc Urban Plan* **104**, p. 95–104.

- TALLIS, M., G. TAYLOR, D. SINNETT and P. H. FREER-SMITH (2011): Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning* **103**, p. 129–138.
- TEEB (2011): *The Economics of Ecosystems and Biodiversity, TEEB Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management*.
- TIMILSINA, T., C. L. STAUDHAMMER, F. J. ESCOBEDO and A. LAWRENCE (2014): Tree biomass, wood waste yield, and carbon storage changes in an urban forest. *Landsc Urban Plan* **127**, p. 18–27.
- TRATALOS, J., R. A. FULLER, P. H. WARREN, R. G. DAVIES and K. J. GASTON (2007): Urban form, biodiversity potential and ecosystem services. *Landsc Urban Plan* **83**, p. 308–317.
- TROXEL, B., M. PIANA, M. S. ASHTON and C. MURPHY-DUNNING (2013): Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA. *Urban For Urban Greening* **12**, p. 144–153.
- TUBBY, K. V. and J. F. WEBBER (2010): Pests and diseases threatening urban trees under a changing climate. *Forestry* **83**, p. 451–459.
- TYRVÄINEN, L., S. PAULEIT, K. SEELAND and S. VRIES (2005): Benefits and Uses of Urban Forests and Trees. *In: KONIJNENDIJK, C., NILSSON, K., RANDRUP, T., SCHIPPERLIJN, J.* (Eds.), *Urban Forests and Trees: A Reference Book*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 81–114.
- UN (2014): *World Urbanization Prospects, the 2014 Revision*. Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York.
- VARGAS, M. C. Q. (2016): Urban tree growth and ecosystem services of locust (*Robinia pseudoacacia*) and lime (*Tilia cordata*) under past, present and future climate conditions. Simulation study for six major cities in Southern Germany, School of Forest Science and Resource Management. TU München, p. 124.
- VERBEIREN, B., T. VAN DE VOORDE, F. CANTERS, M. BINARD, Y. CORNET and O. BATELAAN (2013): Assessing urbanisation effects on rainfall-runoff using a remote sensing supported modelling strategy. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* **21**, p. 92–102.
- VOGT, P., J. R. FERRARI, T. R. LOOKINGBILL, R. H. GARDNER, K. H. RIJTERS and H. OSTAPOWICZ (2009): Mapping functional connectivity. *Ecol Indic* **9**, p. 64–71.
- WARDA, H.-D. (2001): *Das große Buch der Garten- und Landschaftsgehölze*. Bruns Pflanzen Export, Bad Zwischenahn
- WHITLOW, T. H. and N. L. BASSUK (1986): Trees in difficult sites. *J Arboric* **13**, p. 10–17.
- WILBY, R. L. (2003): Past and projected trends in London's urban heat island. *Weather* **58**, p. 251–260.
- YANG, J., J. MCBRIDE, J. ZHOU and Z. SUN (2005): The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening* **3**, p. 65–78.
- YIN, S., Z. SHEN, P. ZHOU, X. ZOU, S. CHE and W. WANG (2011): Quantifying air pollution attenuation within urban parks: an experimental approach in Shanghai, China. *Environ Pollut* **159**, p. 2155–2163.
- YOON, T. K., C.-W. PARK, S. J. LEE, S. KO, K. N. KIM, Y. SON, K.-H. LEE, S. OH, W.-K. LEE and Y. SON (2013): Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. *Urban For Urban Greening* **12**, p. 344–349.
- ZHAO, M. and S. W. RUNNING (2010): Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* **329**, p. 940–943.
- ZHAO, X., X. ZHANG, X. XU, J. XU, W. MENG and W. PU (2009): Seasonal and diurnal variations of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environments in Beijing. *Atmospheric Environment* **43**, p. 2893–2900.
- ZÖLCH, T., J. MADERSPACHER, C. WAMSLER and S. PAULEIT (2016): Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. *Urban Forestry & Urban Greening* **20**, p. 305–316.