



Zentrum Stadtnatur
und Klimaanpassung



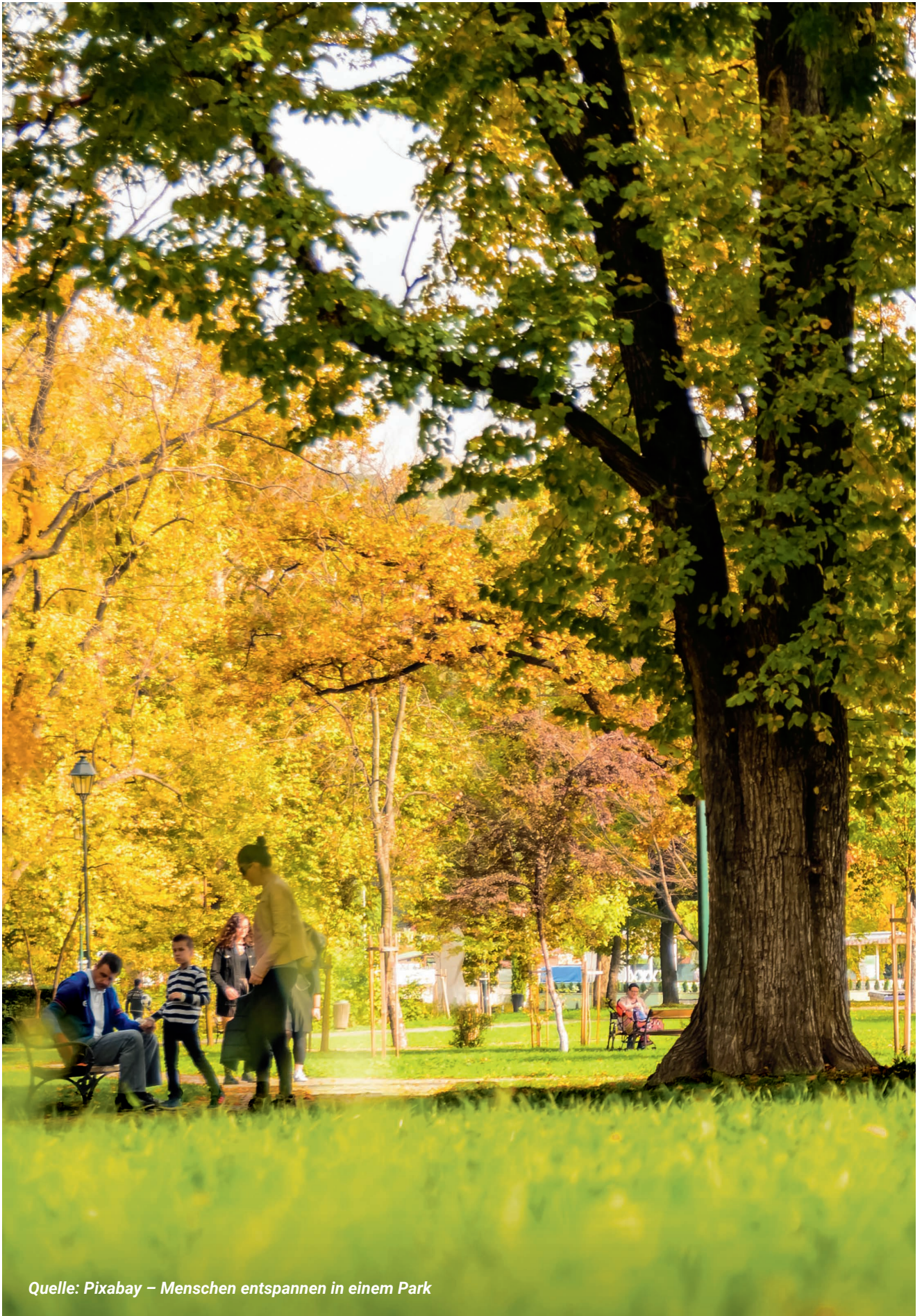
finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Leitfaden Stadtbäume im Klimawandel

Erweiterung des Leitfadens zu Stadtbäumen in Bayern





Quelle: Pixabay – Menschen entspannen in einem Park

STADTBÄUME IM KLIMAWANDEL

Erweiterung des Leitfadens zu Stadtbäumen in Bayern

Der vorliegende Leitfaden stellt für die nachhaltige und klimaresiliente Entwicklung der Baumbestände in Städten wichtige, praxisnahe Informationen bereit. Anhand des Leitfadens können aus einfach zu erhebenden Merkmalen eines Baumes und seiner Umgebung dessen Ökosystemleistungen abgeleitet werden. Für die Planung von neuen Baumpflanzungen lassen sich zu erwartende Wachstums- und Ökosystemleistungen der Bäume abschätzen. Der Leitfaden gibt auch Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung von städtischen Baumbeständen.

Inhalt



20

Relevanz von Stadtbäumen für Mensch und Umwelt

Stadtbäume beeinflussen Umweltleistungen und stellen einen wichtigen Aspekt in der Grünraumplanung von Städten dar



24

Das Stadtklima heute und in Zukunft

Die klimatischen Bedingungen einer Stadt unterscheiden sich deutlich vom ländlichen Klima



28

Baumarten mitteleuropäischer Städte

Städtische Baumbestände sind sehr gut geeignet, den negativen Auswirkungen des Klimawandels entgegenzuwirken



34

Struktur und Dimensionen mitteleuropäischer Stadtbaumarten

Die Stadt und das städtische Umland sind sehr heterogene Räume mit vielfältigen Lebensbereichen



38

Das Wachstumsmodell City Tree

Das Modell CityTree simuliert Wachstum und zahlreiche Ökosystemleistungen in Abhängigkeit des Klimas und der Umweltbedingungen



44

Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in mitteleuropäischen Städten

Stadtbäume erbringen vielfältige Leistungen für das lokale Klima der Städte

6	 	Zusammenfassung
8	 	Die wichtigsten Handlungsempfehlungen für Kommunen
12	 	Abstract
14	 	Key messages for urban planners and municipalities
18	 	Der interaktive Leitfaden und die Erweiterung der zweiten analogen Auflage
20	 	Relevanz von Stadtbäumen für Mensch und Umwelt
24	 	Das Stadtklima heute und in Zukunft
28	 	Baumarten mitteleuropäischer Städte
34	 	Struktur und Dimensionen mitteleuropäischer Stadtbaumarten
35		1. Grundlagen
36		2. Dimensionsveränderungen
38	 	Das Wachstumsmodell CityTree
40		1. Übersicht
42		2. Die einzelnen Module
44	 	Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in mitteleuropäischen Städten
46		1. Ökosystemleistungen von Stadtbäumen
48		2. Basis der Simulationen
58		3. Simulationen zum Einfluss der Baumart
62		4. Simulationen zum Einfluss des Standorts und des Klimas
70		5. Simulationen zum Einfluss kleinräumiger Standortbedingungen
80		6. Simulationen zum Einfluss von Klimaveränderungen
84	 	Literatur
84		Zitierte Literatur
87		Weiterführende Literatur
88	 	Abbildungsverzeichnis
91	 	Tabellenverzeichnis
91	 	Abkürzungsverzeichnis
92	 	Glossar
94	 	Impressum



Zusammenfassung



Stadtbäume sind wesentliche Bestandteile des Bildes einer Stadt. Sie erbringen wichtige Ökosystemleistungen und sorgen für ein angenehmes Stadtklima. Sie gelten deshalb als essenzielle Instrumente für den Umwelt- und Gesundheitsschutz des Menschen sowie als Anpassungsmaßnahme im Klimawandel. Zu ihren Ökosystemleistungen zählen insbesondere die Kühlungswirkung durch Beschattung und Evapotranspiration, die Abflussminderung und die Kohlenstoffspeicherung; weiterhin die Luftschadstofffilterung, die Wasserreinigung, der Erhalt von Biodiversität sowie eine Erholungswirkung.

Die Wuchsbedingungen in Städten stellen Stadtbäume allerdings vor große Herausforderungen, die sich häufig negativ auf die Vitalität, das Wachstum und die erbrachten Ökosystemleistungen auswirken und diese einschränken.

Die vorliegende zweite, erweiterte Auflage des Leitfadens zu Stadtbäumen beschreibt

das Wachstum und die Ökosystemleistungen der zwölf häufigsten Baumarten in mitteleuropäischen Städten. Hintergrund der Berechnungen ist das speziell dafür entwickelte Wachstumsmodell CityTree.

Es wird aufgezeigt, welche Einflüsse die Baumart, der Standort mit seinen kleinräumigen Bedingungen und seinem spezifischen Klima oder auch die Klimaveränderungen jeweils auf Wachstum und die Ökosystemleistungen Kohlenstoffspeicherung, Kühlungswirkung und Abfluss haben. Anhand von Fallbeispielen wird außerdem dargestellt, wie sich Wachstum und Ökosystemleistungen je nach Wuchsbedingungen und Standort verändern.

Spezifische Auswertungen für einzelne Städte, Baumarten, Bodenarten und Zeitperioden sowie für ausgewählte Baumgrößen, Bodenversiegelungen und Horizontüberhöhungen können anhand des interaktiven Leitfadens generiert werden, der parallel zum analogen Leitfaden entstanden ist (www.zsk.tum.de).



Die wichtigsten Handlungsempfehlungen *für Kommunen*

Auf Grundlage der Messungen von über 5.000 Baumindividuen in mehr als 20 Städten sowie zahlreicher Simulationsstudien lassen sich für Städte und Kommunen folgende Handlungsempfehlungen ableiten:

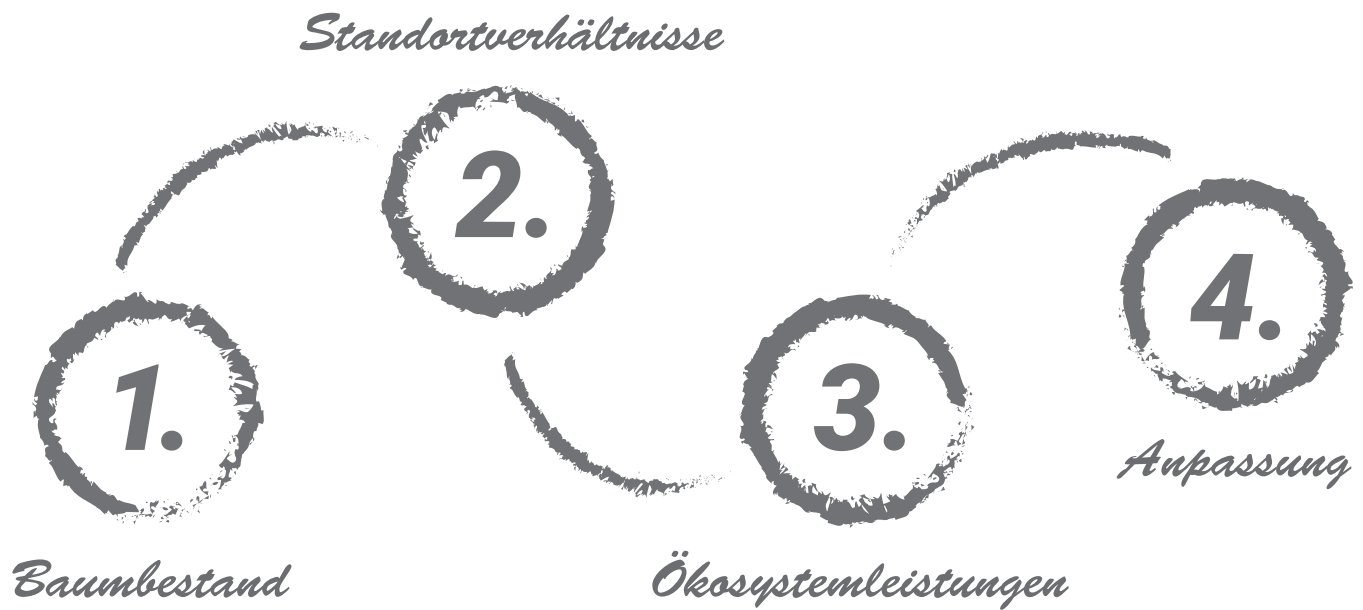
1. Kenntnis und Planung des städtischen Baumbestands

Bäume stellen einen bedeutenden Bestandteil des städtischen Grüns dar. Selbst wenn nur öffentliche Frei- und Grünflächen einbezogen werden, befinden sich oftmals viele tausend bis hunderttausende Bäume in einer Stadt. Auf privaten Freiflächen ist der Baumbestand um ein Vielfaches höher. Die Ökosystemleistungen, die diese Bäume erbringen, sind entscheidend für die Lebens- und Umweltqualität in der Stadt und für ihre Fähigkeit, sich an den Klimawandel anzupassen. Es ist daher wichtig, dass jede Stadt über eine gute Kenntnis ihres Baumbestandes verfügt. Dazu bedarf es eines Baumbestandskatasters im öffentlichen Raum, denn nur was bekannt ist, lässt sich schützen und pflegen. Auch bei Bäumen auf Privatgrundstücken sollte durch Monitoringverfahren, z. B. Stichprobenerhebungen, ein umfassender Überblick über den Bestand und seine

Die Ergebnisse zeigen:

- *Das Wachstum und die Ökosystemleistungen der 12 in mitteleuropäischen Städten häufig anzutreffenden Baumarten ist stark von der Baumart, der Baumdimension, dem Klima sowie von den kleinräumigen Standortbedingungen geprägt.*
- *Mit dem Simulationstool CityTree können der Raumbedarf, das Wachstums und die Ökosystemleistungen von Stadtbäumen quantifiziert und so Planungsentscheidungen unterstützt werden.*
- *Es zeigt sich, dass Extremjahre und Klimaveränderungen Stadtbäume vor große Herausforderungen stellen.*

Mit diesem Leitfaden werden Informationen und Handlungsempfehlungen für die nachhaltige und klimawandelangepasste Entwicklung der städtischen Baumbestände für die Praxis bereitgestellt.



Veränderungen entstehen. Derartige Informationen können heute aus Fernerkundungsdaten wie Satelliten- und Luftbilder sowie ergänzenden Felduntersuchungen mit vertretbarem Aufwand gewonnen werden. Als Grundlage für die Stadt- und Landschaftsplanung sowie für andere Fachplanungen können Baumprogramme mit konkreten Zielen und Maßnahmen die strategische Entwicklung der städtischen Gehölzbestände fördern. Auch bürgerschaftliches Engagement kann für die nachhaltige Sicherung und Entwicklung des Baumbestandes wichtig sein und sollte durch geeignete Maßnahmen, wie z. B. Informationskampagnen, gefördert werden.

2. Optimierung der Standortbedingungen für langfristig gesunde und leistungsfähige Stadtbaumbestände

Die Untersuchungen und Simulationen zeigen eindeutige Zusammenhänge zwischen den Standortbedingungen, dem Wachstum und den Ökosystemleistungen der Bäume. Bei allen untersuchten Baumarten ist ein deutlicher Rückgang des Wachstums bei zunehmender Versiegelung festzustellen. An hochversiegelten Standorten erleiden alle Baumarten einen erheblichen Verlust an Ökosystemleistungen wie

CO₂-Speicherung, Verdunstung oder Luftkühlung durch Evapotranspiration. Je niederschlagsärmer und wärmer das Klima einer Stadt ist, desto geringer sollte der Versiegelungsgrad unter Bäumen sein. Um die Standortbedingungen zusätzlich zu verbessern, sollten zudem ausreichend große Pflanzgruben angelegt werden. Die Raumansprüche der Stadtbäume müssen aber auch oberirdisch berücksichtigt werden. Mit Hilfe des Leitfadens lassen sich die zu erwartenden Dimensionen von Großbaumarten während ihres Wachstums ermitteln. Es ist wichtig, die Raumansprüche von Bäumen zu berücksichtigen, um Konflikte mit Gebäuden und anderen Strukturen zu vermeiden, die dazu führen können, dass Bäume gefällt oder aufwendig und teuer durch Kronenschnitt gepflegt werden müssen. Ein Mangel an oberirdischem Raum bedeutet außerdem einen reduzierten Lichteintritt und damit ein vermindertes Wachstum. Ausgeprägt lichtbedürftige Baumarten wie die Robinie reagieren besonders empfindlich auf Mangel an oberirdischem Raum. In der Planung von Frei- und Grünflächen müssen die Standortbedingungen frühzeitig und gründlich berücksichtigt werden. Ungeeignete Bedingungen können selbst von robusten Arten wie der Platane nicht ausreichend kompensiert werden, insbesondere bei sich verschlechternden Wachstumsbedingungen aufgrund des Klimawandels.

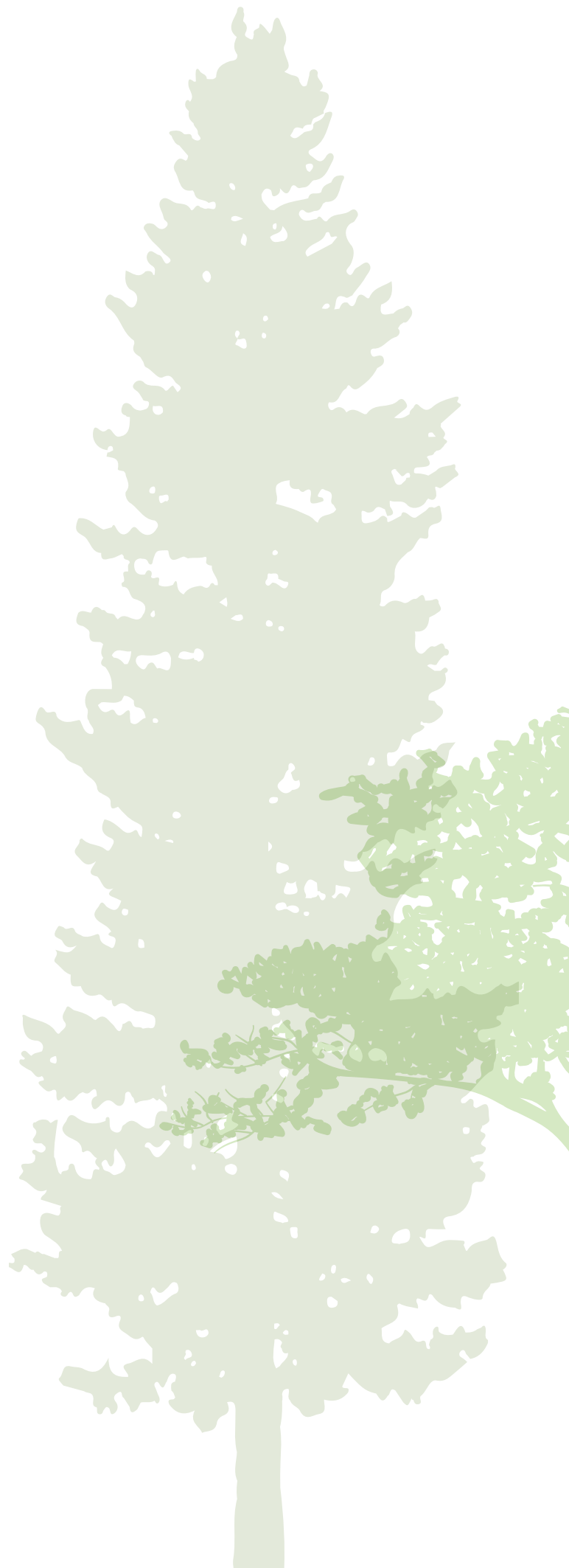
3. Förderung der Ökosystemdienstleistungen durch standortangepasste Baumartenwahl

Die Auswahl standortgerechter Baumarten ist unerlässlich für die Schaffung langlebiger und klimatoleranter Baumbestände mit hohen Ökosystemleistungen. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die ober- und unterirdischen Standraumansprüche sowie die Trockenheitstoleranz der einzelnen Baumarten zu legen. Bei ausreichender Wasserversorgung zeigen Baumarten wie die Winterlinde oder Esche hohe Jahreszuwächse ihrer Biomasse und tragen durch ihre hohe Verdunstungsleistung zur Luftkühlung bei. Im direkten Vergleich bleiben z. B. Rosskastanien oder Birken in ihrer Leistungsfähigkeit deutlich hinter den zuvor genannten Baumarten zurück. Robinien oder Platanen wiederum sind weniger empfindlich gegenüber Wasserknappheit. In Trockenjahren zeigen sich bei ihnen kaum Wachstumseinbußen bzw. Minderungen der Ökosystemleistungen (Rötzer et al. 2021b).

Eine sorgfältige Kenntnis der Standortverhältnisse ist daher bei der Entscheidung für eine Baumart von großer Bedeutung. Die Verfügbarkeit von Wasser ist dabei ein entscheidender Faktor. In Städten mit geringen sommerlichen Niederschlägen und hohen Jahresmitteltemperaturen wie Berlin oder Würzburg ist es von großer Bedeutung, trockenheitsresistente Baumarten auszuwählen. In niederschlagsreichen Städten hingegen wie z. B. Lindau oder München ermöglichen Niederschlagsmengen von über 900 mm auch Baumarten wie der Winterlinde oder der Rosskastanie ein gesundes Wachstum, sofern die Baumpflanzgruben ausreichend groß sind. Auf Flächen mit begrenztem Wurzelraum, wie sie entlang von Straßen und auf Stadtplätzen fast immer anzutreffen sind, stellen aber auch in niederschlagsreichen Städten trockenheitstolerante Baumarten oft die bessere Wahl dar (GALK 2018).

4. Anpassung der Baumartenwahl an den Klimawandel

Die aktuellen Wuchsbedingungen verändern sich. In Mitteleuropa steigen im Sommerhalbjahr die Temperaturen und Trockenperioden nehmen an Häufigkeit und Intensität zu, während es im Winterhalbjahr zu vermehrtem Niederschlag kommen



kann. An Standorten mit extremen Bedingungen wie stark versiegelten Straßen und Plätzen werden einige Baumarten wie beispielsweise die Winterlinde aufgrund von Wassermangel während der Wachstumsperiode zukünftig nicht mehr gesund und stabil wachsen. Der erhöhte Wasserbedarf sollte daher bei der Planung zukünftiger Baumgruben berücksichtigt werden. Bewässerung kann das Wachstum von Bäumen nur begrenzt verbessern und ist zudem nur dann nachhaltig, wenn das Wasser aus örtlich gespeichertem Regenwasser stammt. In Hamburg werden derzeit solche Konzepte im Rahmen des Projekts „BlueGreenStreets“ entwickelt und erprobt (BlueGreenStreets 2020).

Im Hinblick auf klimawandelangepasste Stadtbau-
bestände verdient die Auswahl der geeigneten Baumart besondere Aufmerksamkeit, wobei eine verstärkte Berücksichtigung widerstandsfähiger Baumarten erforderlich ist. Baumarten wie die Robinie, die Eiche oder die Platane sind deutlich besser an extreme Trockenereignisse in den sich häufenden Hitzesommern angepasst als z. B. die Winterlinde oder die Rosskastanie (Dervishi et al 2022). Deswegen empfiehlt es sich, für Standorte in der Stadt mit begrenztem Wurzelraum bei Neupflanzungen oder Ersatzpflanzungen Baumarten wie die Robinie und eine Reihe weiterer Baumarten zu bevorzugen (GALK 2018; Roloff 2013; Niinemets und Valladares 2006).

Die derzeitige Praxis, Baumarten wie z. B. die Winterlinde aus rein ästhetischen Gründen zu pflanzen, muss auf den Prüfstand gestellt werden. Urbane Klimamodelle wie PALM4U (Scherer et al 2019) und klimasensitive Wachstumsmodelle wie CityTree (Rötzer et al. 2019) können inzwischen kleinräumig hochaufgelöste Prognosen zum Klima sowie zu den Wachstums- und Ökosystemleistungen von Baumbeständen liefern, wenngleich lokale Unsicherheiten bestehen bleiben. Dazu zählen auch zukünftige Schädlings- und Krankheitsbefälle von Bäumen (Raum et al. 2023). Daher sollte der Diversifizierung der Baumarten eine hohe Priorität eingeräumt werden. Diversifizierung der Bäume fördert die allgemeine Biodiversität, z. B. von Vögeln und Insekten, aber auch die Widerstandsfähigkeit der Baumbestände gegenüber extremen Witterungsbedingungen, z. B. langanhaltenden Hitze- und Trockenperioden.



Abstract



Urban trees are essential components of a city's image. They provide important ecosystem services and ensure a pleasant urban climate. Trees are thus considered essential instruments for protecting the environment and human health and as an adaptation measure to climate change. These ecosystem services include foremost the cooling through shading and evapotranspiration, the runoff reduction and the carbon storage, but also the filtration of air pollutants, water purification, biodiversity conservation, and recreational benefits.

However, urban growing conditions also pose major challenges to urban trees, and often have a negative impact on their vitality, growth and the ecosystem services they provide.

This second and expanded edition of the Guidelines on Urban Trees describes the growth and ecosystem services of the twelve most common tree species in Central European cities. The calculations are based on the specially developed CityTree growth model.

The guideline shows how the different tree species, the location with its small-scale conditions and its specific climate, or even climate changes impact the growth of trees and the three ecosystem services of carbon storage, cooling effect and runoff. Case studies illustrate how growth and ecosystem services change according to growing conditions and location.

Specific analyses for individual cities, tree species, soil types and time periods, as well as for selected tree sizes, soil sealing and sky view factor can be generated with the interactive guide, which was created in parallel to the analogous guide (www.zsk.tum.de).

Key Messages for Urban Planners and Municipalities

Based on the measurement of over 5,000 individual trees in over 20 cities and numerous simulation studies, the following key messages can be derived for cities and municipalities:

1. *Knowledge and planning of the urban tree population*

Trees are an essential component of urban green spaces; a single city often has thousands to hundreds of thousands of trees in its public open green spaces. In many cases, even more trees grow in private open spaces of cities. The ecosystem services provided by these trees are crucial for the quality of life and the environment of the city, as well as for its ability to adapt to climate change. Therefore, every city needs to have a good knowledge of its tree population and a register of trees in public spaces. Also, for trees growing on private ground, monitoring methods should be used, e.g. random sampling. This will provide a

The results show:

- *The growth and ecosystem services of the 12 tree species commonly found in Central European cities are strongly influenced by the tree species, the tree dimensions, the climate and the small-scale site conditions.*
- *The CityTree simulation tool can be used to quantify the space requirements, growth and ecosystem services of urban trees and thus support planning decisions.*
- *It is evident that extreme years and climate change will pose major challenges for urban trees.*

This guide provides practical information and recommendations for action for the sustainable and climate change-adapted development of urban tree populations.



comprehensive overview of the tree stock and the changes it has undergone. Today, such information can be obtained from remote sensing data such as satellite and aerial images, as well as supplementary field surveys. As a basis for urban, landscape and other specialist planning, tree programmes with specific objectives and measures can promote the strategic development of urban tree populations. Civic engagement can also be important for the sustainable protection and development of the tree population and should be promoted through suitable measures, for example information campaigns.

2. Optimizing site conditions for long-term healthy and productive urban tree populations

The studies and simulations show clear correlations between the site conditions, tree growth and ecosystem services of the trees. For all tree species analyzed, a significant decline in growth is observed with increasing soil sealing. On highly sealed sites, all tree species suffer a considerable loss of ecosystem services such as CO₂ storage, evaporation and air cooling through evapotranspiration. The less precipitation and the warmer the climate of a city, the lower the degree of sealing under trees should be. In addition, sufficiently large planting pits should be used to improve site conditions. The above-ground space requirements of urban trees should also be considered. The guide can be used to determine the expected dimensions of tree species as they grow. It is important to assess space requirements to avoid conflicts with buildings and other structures, which can result in tree removal or costly and time-consuming crown pruning. Lack of above-ground space also means reduced light penetration and thus reduced growth. Light-demanding tree species such as the black locust are particularly sensitive to this. When planning open and green spaces, the site conditions must be considered thoroughly at an early stage. Unsuitable conditions cannot be adequately compensated for, even not by robust tree species such as the London plane tree, especially if growing conditions continue to deteriorate due to climate change.

3. Promoting of ecosystem services by selecting tree species adapted to the site

The selection of appropriate tree species is essential for creating long-lived and climate-tolerant tree populations with high ecosystem services. Special attention should be paid to the above- and below-ground habitat requirements and the drought tolerance of the tree species. With a sufficient water supply, tree species such as small-leaved lime or ash show high annual increases in biomass and contribute to air cooling through their high evaporation capacity. In comparison, horse-chestnut or birch, for example, lag far behind the aforementioned tree species in terms of their performance. Black locust or London plane trees, on the other hand, are less sensitive to water scarcity, with hardly any loss of growth or ecosystem services in dry years (Rötzer et al. 2021b).

Careful knowledge of the site conditions is therefore crucial when deciding on a tree species. A key factor is the availability of water. In cities with low summer precipitation and high average annual temperatures, such as Berlin or Würzburg, the selection of drought-resistant tree species is of great importance. This is different in cities with high rainfall, such as Lindau or Munich. Their precipitation levels



Urban Trees



Ecosystem services

of more than 900 mm allow for the healthy growth also of tree species such as the small-leaved lime or horse-chestnut, provided the tree planting pits are large enough. In areas with limited root space, as is almost always the case on streets and city squares, drought-tolerant tree species are often the better choice, even in cities with high levels of precipitation (GALK 2018).

4. Adapting the choice of tree species to climate change

Currently, growing conditions are changing. In Central Europe, temperatures are rising in the summer months, droughts are increasing in frequency and intensity, while precipitation may increase in the winter months. In locations with extreme conditions, such as heavily sealed roads and squares, some tree species such as the small-leaved lime will no longer be able to grow healthily and stably in future due to the lack of water during the growing season. The increased water requirements should therefore be taken into account when planning future tree pits. Irrigation can only improve tree growth to a limited extent and is only sustainable if the water comes from locally stored rainwater. In Hamburg, such concepts are currently being developed and tested as part of the „BlueGreen-Streets“ project (BlueGreenStreets 2020).

The choice of tree species deserves special attention when it comes to climate change-adapted urban tree populations. Greater consideration must be given to more resilient tree species. Species such as black locust, oak or London plane tree are much better adapted to extreme drought events in the increasingly hot summers than, for example, small-leaved lime or horse-chestnut (Dervishi et al 2022). It is thus advisable to favor tree species such as black locust and a number of other specific tree species for new plantings or replacement plantings in urban locations with limited root space (GALK 2018; Roloff 2013, Niinemets and Valladares 2006).

The current practice of planting tree species such as the small-leaved lime tree for mere aesthetic reasons must be scrutinized. Urban climate models such as PALM4U (Scherer et al 2019) and climate-sensitive growth models such as CityTree (Rötzer et al. 2019) can now provide small-scale, high-resolution forecasts of both climate and the growth and ecosystem services of tree populations. Yet, local uncertainties remain. This also applies to future pest and disease infestations of trees (Raum et al. 2023). Therefore, diversification of tree species should be prioritized. Tree diversification promotes general biodiversity, e.g. of birds and insects, but also the resilience of tree populations to extreme weather conditions, such as prolonged periods of heat and drought.



2.

Site conditions



4.

Adaptation

Der interaktive Leitfaden und die Erweiterung der zweiten analogen Auflage

Für Stadtplanung und Landschaftsarchitektur werden konkrete Informationen benötigt, mit denen sich optimierte Baumpflanzungen planen und Gestaltungsentwürfe entwickeln sowie überprüfen lassen. Folgende Fragen tauchen hierbei vermehrt auf:

- Wie groß werden Stadtbäume, wie breit ihre Kronen?
- Um wieviel kühlen sie ihre Umgebung unter bestimmten Wuchsverhältnissen ab?
- Mit welcher Wuchsleistung ist bei einer bestimmten Art, z. B. bei einer Winterlinde, im Vergleich zu einer anderen Art, z. B. einer Buche, zu rechnen und was bedeutet das für die Ökosystemleistungen?
- Wie werden sich das Baumwachstum und die Ökosystemleistungen durch den Klimawandel bei verschiedenen Baumarten ändern?
- Welche Baumarten sind in Zukunft besser in einer bestimmten Stadt geeignet?
- Wieviel CO₂ wird der Atmosphäre von einem Baum pro Jahr entzogen?





Abbildung 1

Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt

Quelle: ZSK Teilprojekt 1

Der Leitfaden hilft, solche Fragen zu beantworten. Auf Grundlage der Ergebnisse des Projekts „ Stadtbäume im Klimawandel“ (2013-2018) wurde unter dem Dach des ZSK 2021 erstmals ein detailliertes Zahlenwerk zu Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in bayerischen Städten vorgelegt. Zusammen mit dem interaktiven Leitfaden zeigt die zweite Auflage des analogen Leitfadens das Wachstum und die Ökosystemleistungen von zwölf Baumarten in über 30 Städten in Deutschland auf. Damit ist es möglich, Wachstum, Kohlenstoffspeicherung, Wasserverbrauch, Abfluss und Kühlungswirkung in Abhängigkeit von Baumart und Baumgröße sowie in Abhängigkeit vom Standort zu quantifizieren. Ökosystemleistungen vorhandener Baumbestände können dadurch abgeschätzt und als Grundlage für Bestandsbewertungen sowie für Prognosen verwendet werden. Der Leitfaden unterstützt damit die Anpassung der Grünraumplanung in Städten an den Klimawandel.

Die im Leitfaden präsentierten Ergebnisse beruhen auf einer umfassenden Erhebung von Stadtbäumen in deutschen Städten. Insgesamt wurden Bäume von zwölf Baumarten vermessen und erfasst: Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Birke (*Betula pendula*), Eiche (*Quercus robur*), Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Hainbuche (*Carpinus betulus*), Platane (*Platanus x acerifolia*), Robinie (Scheinakazie) (*Robinia pseudoacacia*), Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*), Buche (*Fagus sylvatica*), Säulenpappel (*Populus nigra* ‚Italica‘), Spitzahorn (*Acer platanoides*) und Winterlinde (*Tilia cordata*). Diese Baumarten stellen die zwölf häufigsten Stadtbaumarten Mitteleuropas dar (Weller 2021). Zudem repräsentieren sie unterschiedliche Baumphysiologien (Licht- bis Schattenbaumarten, Ring- bis Zerstreutporer, trockentolerant bis -intolerant). Dadurch lassen sich die Erkenntnisse auch auf Baumarten mit ähnlichen Eigenschaften zumindest qualitativ übertragen.



Quelle: Thomas Rötzer – Alte Pinakothek in München



Relevanz von Stadtbäumen für Mensch und Umwelt



11%
Spitzahorn



9%
Winterlinde



8%
EICHE

Abbildung 2

Blattformen der mit am häufigsten vorkommenden Baumarten in mitteleuropäischen Städten

Quelle: Weller 2021

Bäume sind ein prägender Bestandteil städtischer Frei- und Grünflächen und aus diesen nicht wegzu-denken. Was wären unsere Parkanlagen, Gärten, Plätze und Straßen ohne Bäume? Sie schaffen Räume, gliedern die Stadt und verschönern das Stadtbild. Die Vielfalt der Pflanzungen und Baumarten erhöht das Wohlbefinden der Stadtbewohner und Besucher mit verschiedenen Wuchs- und Blattformen, Farben und Blüten. In bayerischen Großstädten wie Regensburg oder München kommen mehr als einhundert Baumarten vor: von den häufig gepflanzten Linden, Ahornen, Birken, Kastanien, Pappeln und Eschen bis hin zu Raritäten, die man nur an wenigen Stellen antrifft, etwa den nordamerikanischen Geweihbaum (*Gymnocladus dioica*) oder die chinesische Flügel-nuss (*Pterocarya stenoptera*).

Allein die Zahl der Bäume auf öffentlichen Frei- und Grünflächen wird für München auf ca. 600.000

geschätzt (Wilhelm 2019); in Würzburg sind es immerhin fast 40.000 Bäume (Limmer 2018). Nach Leichtle et al. (2024) beträgt die Anzahl aller Bäume in München im öffentlichen und privaten Raum ca. 1,5 Millionen. Sie alle zusammen tragen zur Vielfalt der Lebensformen und des Erlebnisreichtums in der Stadt bei und fördern die Biodiversität, denn Bäume sind bedeutende Lebensräume für Vögel, Bienen, Käfer, Fledermäuse und viele weitere Tierarten.

Bäume sind wichtig für die Verbesserung der Umweltverhältnisse in der Stadt (Ferrini et al. 2017; Roloff 2013). Sie speichern Kohlenstoff und wirken somit dem Klimawandel entgegen. Durch Verschattung und Verdunstungskühlung mindern sie die Lufttemperatur (Rahman et al. 2020). Bäume können vermehrt auftretende Hitzewellen ausgleichen und so zur Anpassung der Stadt an den Klimawandel beitragen. Auch den Regenwasserabfluss nach Starkregen können Bäume



5%

Platane



3%

Rosskastanie

vermindern, indem sie das Regenwasser in ihrer Krone auffangen und die Versickerung des in den Boden infiltrierten Wassers verlangsamen. Dadurch verringert sich das Risiko von lokalen Überschwemmungen durch die Überlastung der Kanalisation.

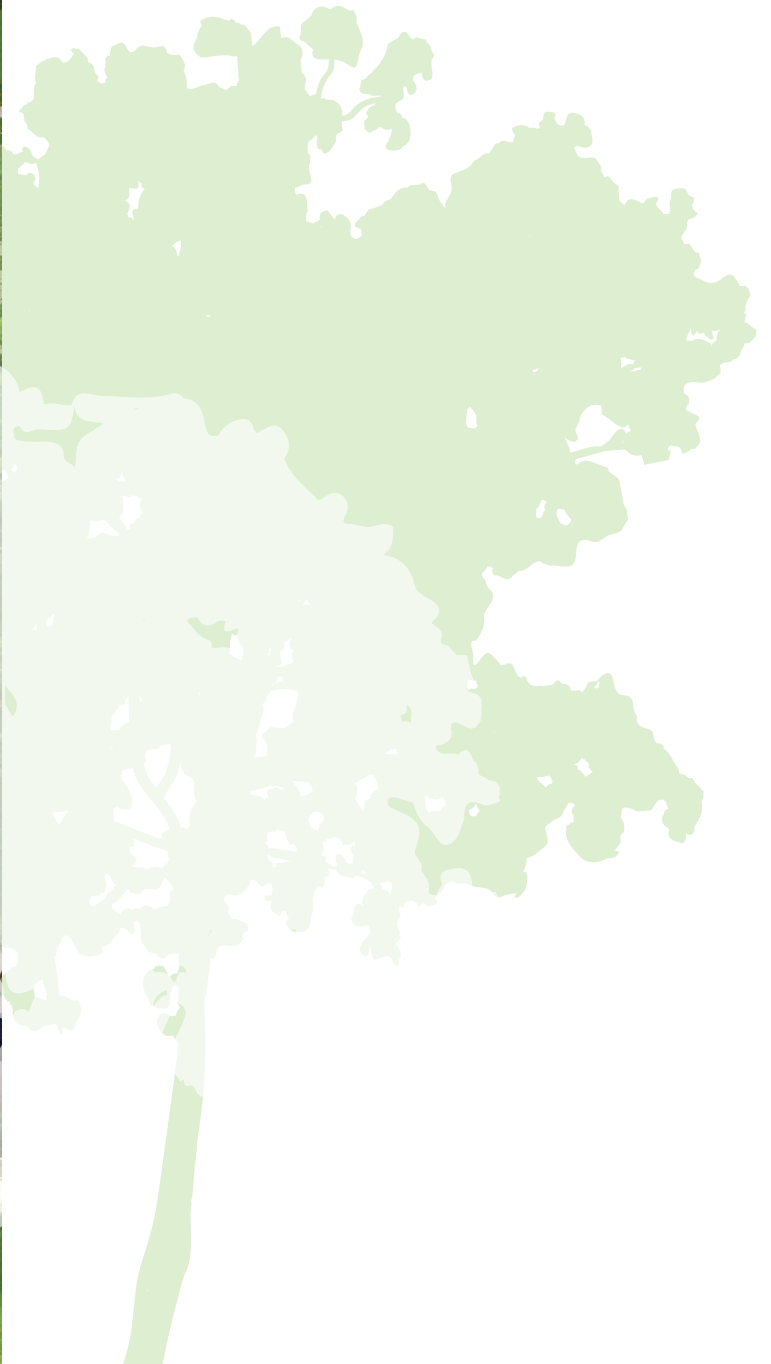
Bäume filtern zudem Schadstoffe aus der Luft und verbessern damit die Luftqualität (TEEB DE 2016). In welchem Umfang Bäume diese Leistungen erbringen, hängt von vielen Faktoren ab: ihrer Anzahl bzw. ihrem Anteil an den städtischen Frei- und Grünflächen, ihrer Vitalität, ihrer Größe, dem Alter oder der Art und Weise, wie sie gepflanzt werden, z. B. als Einzelbaum oder in Gruppen. Auch gibt es signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Baumarten: Eine Linde etwa wirft einen dichten Schatten, eine Robinie dagegen verschattet die unter ihr befindliche Fläche viel weniger. Um dafür zu sorgen, dass es in der Stadt ausreichend Bäume gibt und diese

auch einen geeigneten Standort mit ausreichend Platz finden, sind die unterschiedlichen Ansprüche einzelner Baumarten frühzeitig in der Frei- und Grünflächenplanung zu berücksichtigen.

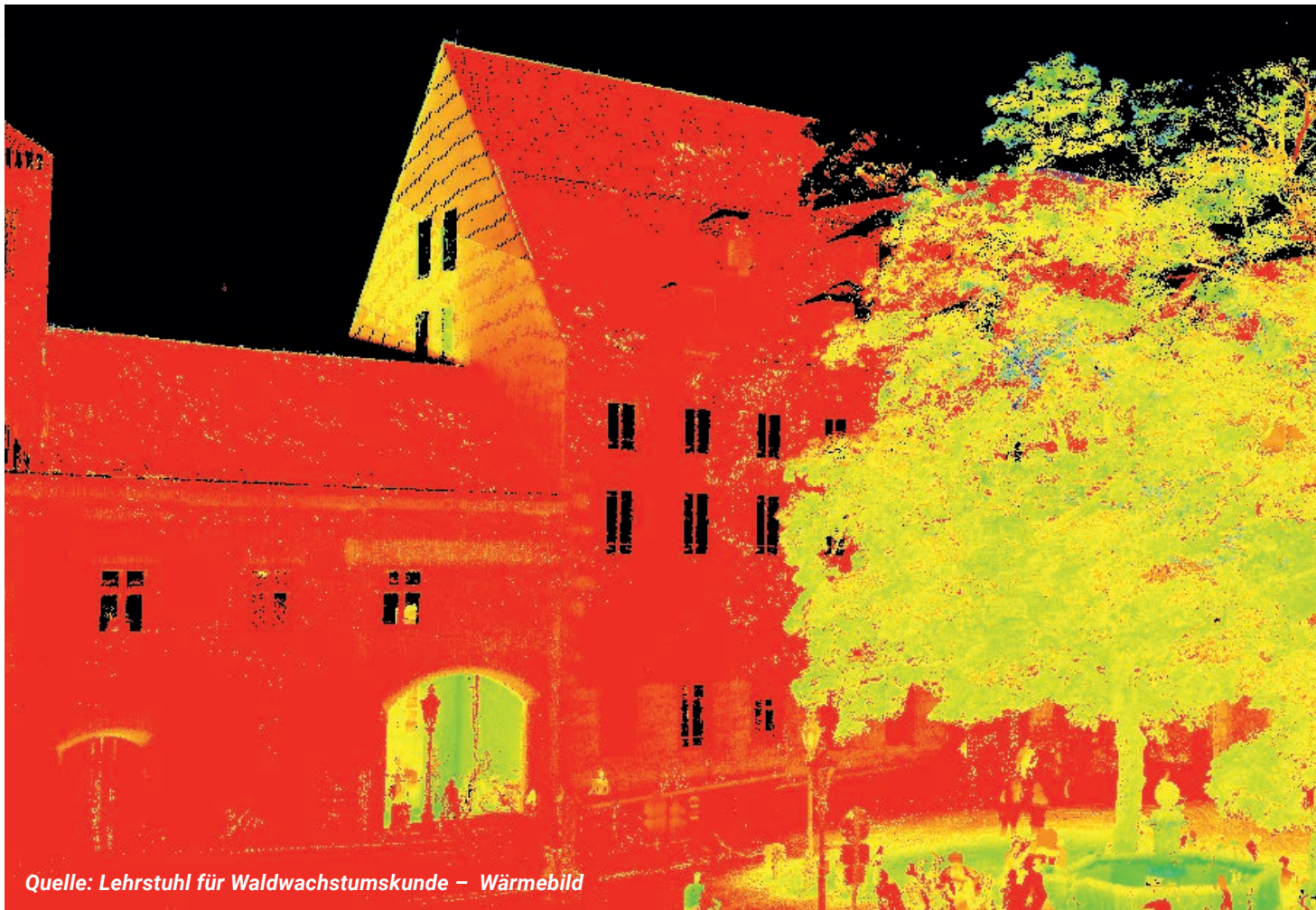
Bei Pflanzungen sollen die Standortbedingungen der Baumarten optimiert werden. Denn Bäume erbringen ihre Ökosystemleistungen nur dann umfassend, wenn sie gesund sind und gut wachsen können. Das Wachstum von Stadtbäumen beeinflusst ferner nicht nur deren Größe, sondern auch deren Struktur- und Umweltleistungen. Das erwartbare Wachstum stellt einen wichtigen Aspekt in der Grünraumplanung von Städten dar, der bis jetzt aber kaum untersucht worden ist (McHale et al. 2009; Moser et al. 2015). So ist bisher wenig darüber bekannt, wie Bäume sich an einem bestimmten Ort, etwa auf einem Platz oder im Straßenraum, mit seinen spezifischen Standortbedingungen entwickeln werden.



Quelle: Thomas Rötzer – Stadtgebiet München



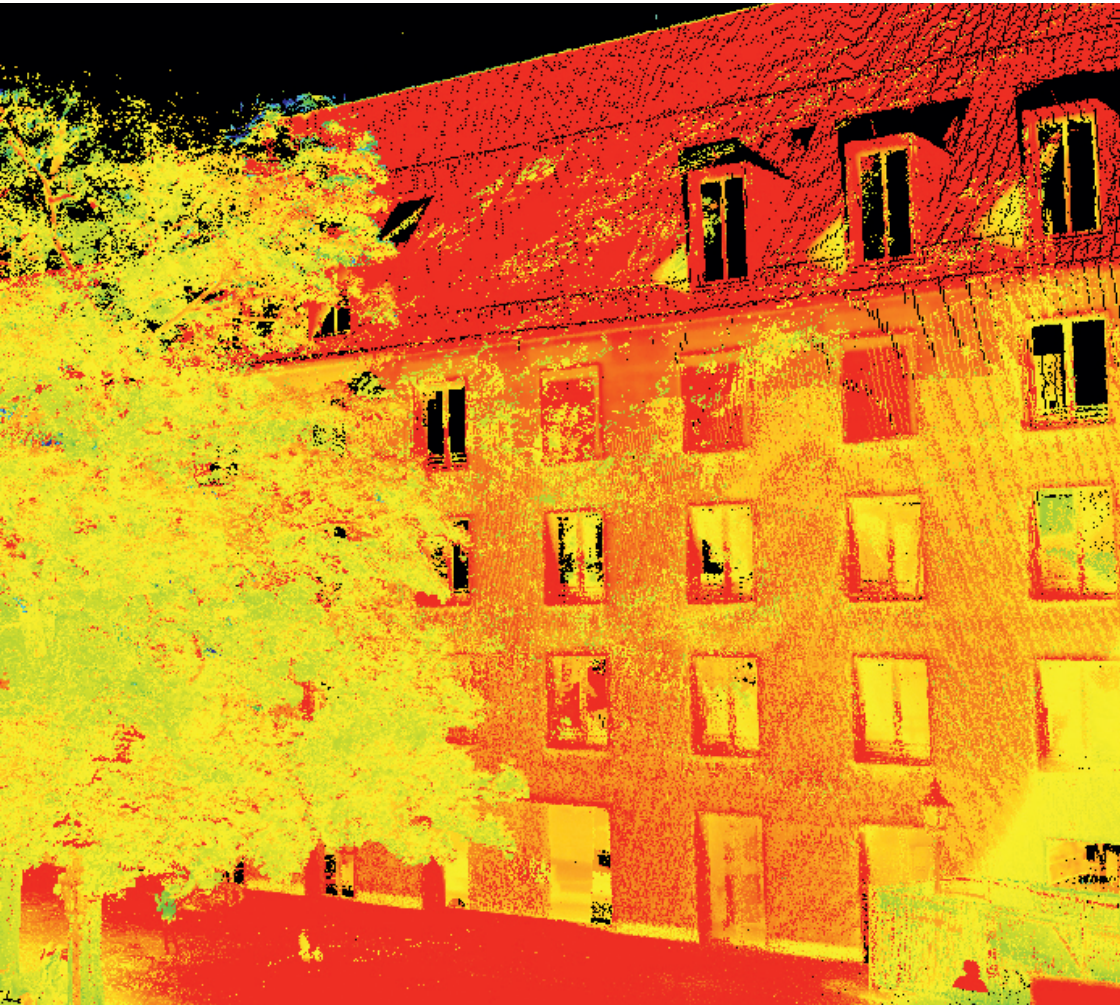
Das Stadtklima *heute und in Zukunft*



Die klimatischen Bedingungen einer Stadt unterscheiden sich deutlich von denen, die in ihrer unmittelbaren Umgebung vorherrschen (vgl. Kuttler 2004). Das Stadtklima ist durch eine im Mittel höhere Lufttemperatur, eine niedrigere relative Luftfeuchtigkeit sowie durch eine tendenziell geringere Windgeschwindigkeit mit allerdings höherer Turbulenz der Luft charakterisiert. Der Unterschied der Temperaturen zwischen Stadt und Umland ist als städtischer Wärmeinseleffekt bekannt, wie von Oke (1982) beschrieben, und kann je nach Größe der Stadt variieren. Im Mittel bewirkt der Effekt einen Unterschied von 2 °C. An einzelnen Tagen können sehr starke Temperaturunterschiede auftreten, an denen es in der Stadt bis zu 10 °C wärmer als in ihrer Umgebung ist. Der Wärmeinseleffekt ist nachts besonders groß, da die Wärme, die tagsüber in bebauten und versiegelten Flächen gespeichert wird, wieder an die Umgebung abgegeben wird (Kuttler 2004). Der Wärmeinseleffekt entsteht vor allem durch das Entfernen von Pflanzen und Wasserflächen und deren Ersatz

durch bebaute und asphaltierte oder gepflasterte Straßen und Plätze. Mit der Zunahme der städtischen Bevölkerung und der damit verbundenen Urbanisierung in den letzten Jahrzehnten haben der Bebauungsgrad und die Größe der Städte stark zugenommen. Während die Temperaturdifferenz des Jahresmittels zwischen der Stadt München und seiner ländlichen Umgebung am Anfang der 50er Jahre lediglich 0,1 °C betrug, lag die Differenz für den Zeitraum 2017-2021 bei 1,3 °C (Werte des Deutschen Wetterdienstes).

Regionale klimatische Effekte und Erscheinungen wie der Föhn oder der großräumige Luftaustausch können den Wärmeinseleffekt der Städte beeinflussen. Außerdem ist der Effekt innerhalb einer einzelnen Stadt uneinheitlich. In Städten variieren die klimatischen Eigenschaften aufgrund der heterogenen Bebauungsstruktur in den einzelnen Vierteln mit ihrer unterschiedlich dichten Bebauung und ihrem individuellen Straßen- und Grünflächenanteil. So können sich



*Wärmebild des Alten Hofes in München.
Die Gebäude zeichnen sich durch
starke Hitzebelastung aus, während
die Bäume kühle Inseln sind.*

stark besonnte und versiegelte Flächen, über denen die Luft sich aufwärmen kann, mit beschatteten, kühleren Bereichen abwechseln. Zudem hängen auch die Windverhältnisse in hohem Maße von der kleinräumigen Struktur der urbanen Landschaft ab.

Der globale Klimawandel verändert zunehmend die klimatischen Bedingungen auch in Ballungsräumen. Sollte sich die derzeitige Entwicklung einer verstärkten städtebaulichen Verdichtung und damit einhergehenden höheren Flächenversiegelung fortsetzen, wird es in den Innenstädten noch heißer werden und die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Land werden weiter zunehmen. Der Klimawandel beeinflusst auch die Niederschlagsverhältnisse. Den Simulationen für das Klimaszenario RCP 8.5 zufolge werden die Sommerhalbjahre trockener, während es

im Winter tendenziell mehr regnen und schneien wird (IPCC 2022). Außerdem ist eine signifikante Erhöhung der Temperaturen bis zum Jahr 2100 zu erwarten. Diese Veränderungen dürften regional unterschiedlich ausfallen und für bestimmte Regionen drastische Auswirkungen haben. In Städten wie Berlin oder Würzburg, die bereits heute durch ein trocken-warmes Klima charakterisiert sind, könnten ein signifikanter Wassermangel für das städtische Grün sowie zunehmender Hitzestress für die Bevölkerung entstehen.

Infolgedessen wird es künftig umso wichtiger, effektiv den städtischen Wärmeinseleffekt abzuschwächen und begrünte Freiräume zu planen und umzusetzen, um an Hitzetagen kühle Oasen für Mensch und Tier bieten zu können. Die Erhöhung des urbanen Grünanteils ist eine wirksame Anpassungsmaßnahme, die vor allem durch Baumpflanzungen, aber auch durch Fassaden- und Dachbegrünungen den negativen Auswirkungen des Klimawandels entgegenwirken kann.



Quelle: Stephan Pauleit – Englischer Garten in München



Urbane Baumbestände haben sich als sehr geeignet erwiesen, um den negativen Auswirkungen des Klimawandels und der Umweltveränderungen entgegenzuwirken. Um die Baumbestände der Städte analysieren und effektiv managen zu können, sind Baumkataster sehr hilfreich. Sie zeigen zudem, welche Baumarten in den Städten gepflanzt wurden, bzw. wie häufig die einzelnen Baumarten vorkommen. In einer Studie von Weller (2021) wurden die Baumkataster von 52 Städten in Mitteleuropa ausgewertet.

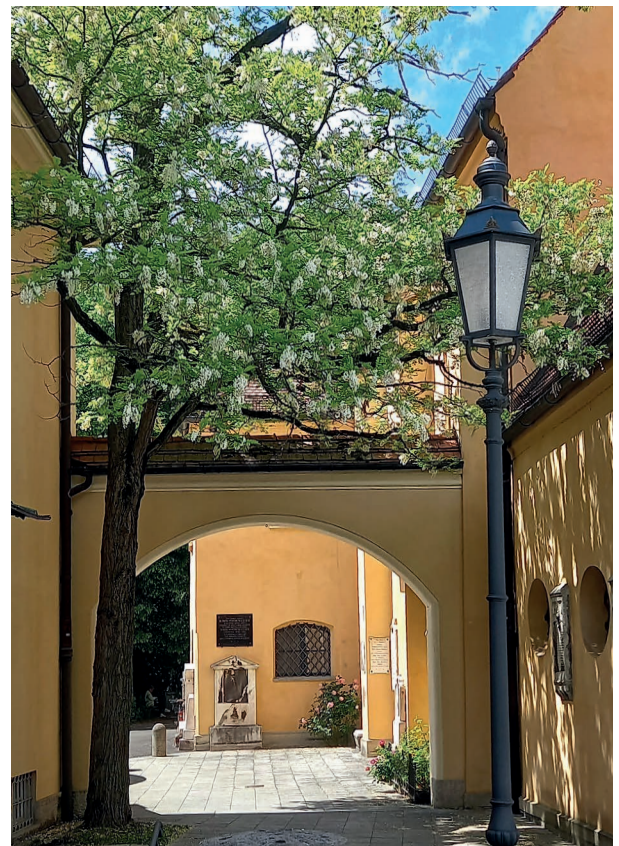
Baumarten mitteleuropäischer Städte



Straßenbaumallee an einer viel befahrenen Straße in München (oben) und eine einzelne Robinie an einem hoch versiegelten Standort in München (unten).

Die untersuchten Städte liegen alle in der temperierten Klimazone und reichen von Kopenhagen/Dänemark im Norden bis nach Bozen/Norditalien im Süden sowie von Metz/Frankreich im Westen bis nach Warschau/Polen im Osten (Weller 2021). Neben Großstädten wie Berlin mit mehr als drei Millionen Einwohnern wurden auch Kleinstädte mit weniger als 50.000 Einwohnern wie Weiden/Deutschland oder Meran/Italien mit in die Analysen einbezogen.

Über alle Städte hinweg konnten 376 Baumarten identifiziert werden. Mehr als die Hälfte aller Bäume der untersuchten Kataster können den vier Baumgattungen *Acer* (20,3 %), *Tilia* (18,1 %), *Quercus* (9,4 %) und *Fraxinus* (5,1 %) zugeordnet werden. Bezogen auf die Baumarten sind die häufigsten drei Arten der Spitzahorn (*Acer platanoides*) mit 11 %, die Winterlinde (*Tilia cordata*) mit 9 % und die Stieleiche (*Quercus robur*) mit 8 %. Es folgen Hainbuche (*Carpinus betulus*), Platane (*Platanus x acerifolia*), Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) und Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*) mit je 5 % (siehe Abbildung 3, Seite 32). Weitere häufig gepflanzte Baumarten sind die Birke (*Betula pendula*), Rosskastanie (*Aesculus hippocastanum*), Robinie (*Robinia pseudoacacia*), Pappel (*Populus nigra*) oder die Buche (*Fagus sylvatica*). Interessanterweise befindet sich keine Koniferenart unter den häufigsten Baumarten in temperierten Städten.



Quelle: Thomas Rötzer, Werner Lang



Häufige Stadtbaumarten:
 Robinie • *Robinia pseudoacacia* (oben links) und
 Platane • *Plantanus x acerifolia* (oben rechts)
 in Würzburg, Rosskastanie • *Aesculus*
hippocastanum (unten links) und Säulenpappel •
Populus nigra (unten rechts) in München

Quelle: Thomas Rötzer, Werner Lang, Astrid Reischl, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde

Baumarten

in mitteleuropäischen Städten

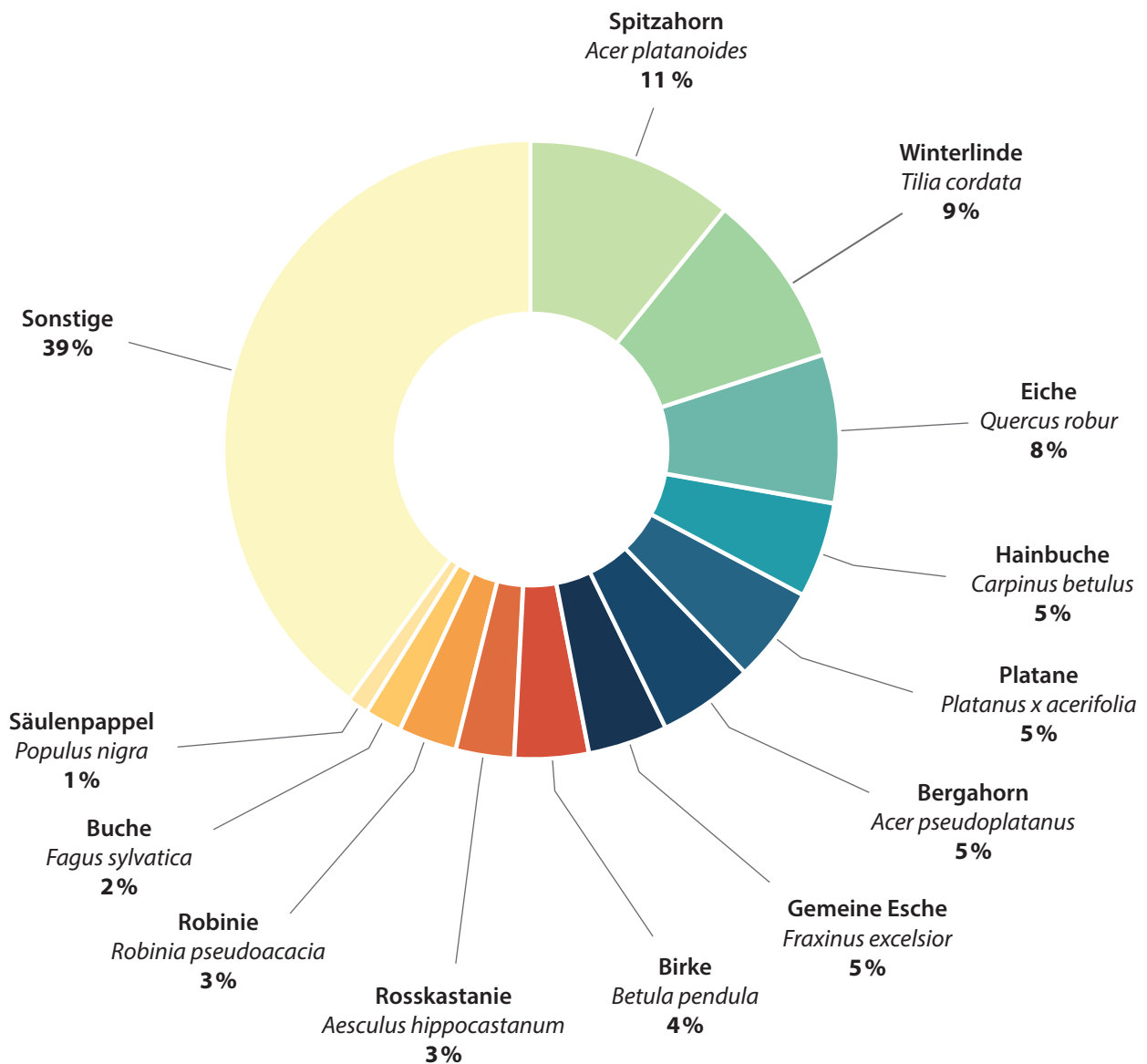


Abbildung 3

Prozentanteil der Baumarten
in mitteleuropäischen Städten

Quelle: Weller 2021

Zusammengenommen decken diese 12 Baumarten 60 % aller in den 52 Städten anzutreffenden Arten ab. Deshalb wurden für das Modell CityTree mehr als 5.000 Baumindividuen genau dieser Arten in mitteleuropäischen Städten vermessen und analysiert. Sie bilden die Grundlage für die Parametrisierung

der Baumarten im CityTree-Modell, mit dem daher das Wachstum und die Ökosystemleistungen dieser 12 Baumarten simuliert werden kann. Diese Baumarten decken zudem eine breite ökologische Spanne der Arten im Hinblick auf den Licht- und Wasserbedarf und die Trockentoleranz ab (siehe Tabelle 1).

	Baumart	wissenschaftlicher Name	Herkunft	Toleranz gegenüber		
				Beschattung	Trockenheit	Stauanässe
1	Bergahorn	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Gebirge Europas und Westasiens	3,7	2,8	1,1
2	Bergulme	<i>Ulmus glabra</i>	Nord- und Mitteleuropa, Westasien	3,5	2,4	2,0
3	Birke	<i>Betula pendula</i>	Europa, Kleinasien, Kaukasus, Nordpersien	2,0	1,9	1,7
4	Buche	<i>Fagus sylvatica</i>	Europa	4,6	2,4	1,0
5	Eiche	<i>Quercus robur</i>	Europa, Kleinasien	2,5	3,0	1,9
6	Esskastanie	<i>Castanea sativa</i>	Mittelmeerraum	3,2	3,5	1,3
7	Flatterulme	<i>Ulmus laevis</i>	West-, Mittel- bis Osteuropa, Kaukasus	3,7	1,5	2,8
8	Gemeine Esche	<i>Fraxinus excelsior</i>	Europa, Kleinasien, Nordafrika, Mittlerer Osten	2,7	2,5	2,7
9	Ginkgo	<i>Ginkgo biloba</i>	China	1,3	4,0	1,1
10	Gleditschie	<i>Gleditsia triacanthos</i>	Nordamerika	1,6	5,0	2,7
11	Hainbuche	<i>Carpinus betulus</i>	Europa, Balkan, Kaukasus, Nordpersien	4,0	2,7	1,7
12	Platane	<i>Platanus x acerifolia</i>	England (Kreuzung)	3,0	3,4	2,6
13	Robinie	<i>Robinia pseudoacacia</i>	östliches Nordamerika	1,7	4,1	1,1
14	Roskastanie	<i>Aesculus hippocastanum</i>	Balkan, Mitteleuropa	3,4	2,8	1,4
15	Roteiche	<i>Quercus rubra</i>	Östliches Nordamerika	2,8	2,9	1,1
16	Säulenpappel	<i>Populus nigra</i> ‚Italica‘	Italien	2,5	2,2	3,7
17	Schnurbaum	<i>Sophora japonica</i>	China, Korea	3,0	2,8	1,5
18	Schwarzerle	<i>Alnus glutinosa</i>	Europa, Sibirien, Westasien, Persien, Nordafrika	2,7	2,2	3,9
19	Schwarzkiefer	<i>Pinus nigra</i>	Mittelmeerraum und Österreich	2,1	4,4	1,4
20	Schwedische Mehlbeere	<i>Sorbus intermedia</i>	Skandinavien, Baltikum	2,7	2,2	1,0
21	Silberlinde	<i>Tilia tomentosa</i>	Kleinasien, Südosteuropa	3,3	2,8	1,5
22	Sommerlinde	<i>Tilia platyphyllos</i>	West-, Mittel- und Südeuropa	4,0	2,5	1,0
23	Spitzahorn	<i>Acer platanoides</i>	Europa, Kleinasien und Nordpersien	4,2	2,7	1,5
24	Stechfichte	<i>Picea pungens</i>	Gebirge westliches Nordamerika	3,5	2,9	1,0
25	Traubeneiche	<i>Quercus petrae</i>	Europa, Südwestrussland, Schwarzes Meer	2,7	3,0	1,2
26	Vogelkirsche	<i>Prunus avium</i>	Mittel- und Südeuropa, Kleinasien von Kaukasus bis Ostasien, Nordamerika	3,3	2,7	1,2
27	Walnuss	<i>Juglans regia</i>	Mittelmeerraum und Vorderasien	2,3	3,0	1,4
28	Winterlinde	<i>Tilia cordata</i>	Europa	4,2	2,8	1,8
29	Zerreiche	<i>Quercus cerris</i>	Südeuropa, Kleinasien	2,6	4,3	1,3
30	Zitterpappel	<i>Populus tremula</i>	Europa, Kleinasien, Sibirien	2,2	2,9	2,1

Ausgewählte Baumarten, für die Simulationen mit CityTree durchgeführt werden können ; Toleranz: hoch mittel gering

Tabelle 1

Häufig in Städten vorkommende Baumarten, deren Herkunft und Toleranzen gegenüber Beschattung, Trockenheit und Stauanässe

Quelle: GALK Straßenbaumliste 2018, Roloff 2013; Toleranzen: Niinemets und Valladares 2006



Quelle: Thomas Rötzer – Hohenzollernplatz in München



1. Grundlagen

Die Stadt und das städtische Umland sind sehr heterogene Räume, die vielfältige Lebensbereiche für Flora, Fauna und Mensch zur Verfügung stellen. Der Versiegelungsgrad der Flächen, der Anteil an Bebauung, der Wärme- und Strahlungshaushalt sowie der Anteil von Wiesenflächen und grünen Infrastrukturen an städtischen Plätzen und Parks sind jeweils sehr verschieden. Gleiches gilt für den Grünbestand in Straßenzügen mit Haupt- und Seitenstraßen, entlang von Eisenbahn-, Straßenbahn oder oberirdischen S/U-Bahn-Linien, auf Parkplätzen, in Wohnungsblöcken und in privaten Gärten (Pauleit & Duhme 1999). Für Stadtbäume bedeutet dies ein meist sehr ungleiches Angebot an pflanzenverfügbarem Wasser, Nährstoffen sowie an Raum für Kronen und Wurzeln.

Im Vergleich zu Waldbäumen und Bäumen in großen Parkanlagen leiden Bäume an extremen Standorten wie an Straßen und auf Stadtplätzen häufig an Hitze- und Trockenstress. Daneben bedingen die oft sehr kleinen Pflanzgruben eine verminderte Sauerstoff- und Nährstoffversorgung der Wurzeln. Die Böden unter den Bäumen sind darüber hinaus häufig versiegelt und durch den Straßenverkehr stark verdichtet. Anthropogene (durch Menschen verursachte) Prozesse führen zu hohen Schadstoffeinträgen durch Luftverschmutzung. Aber auch Streusalze im Winter können das Wachstum negativ beeinflussen. Diese Faktoren des Lebensbereiches „Stadt“ wirken sich vielfach negativ auf die Wuchsleistung und die Vitalität von Stadtgrün aus (Meyer 1978; Roloff 2013).

Struktur und Dimension mitteleuropäischer Stadtbaumarten

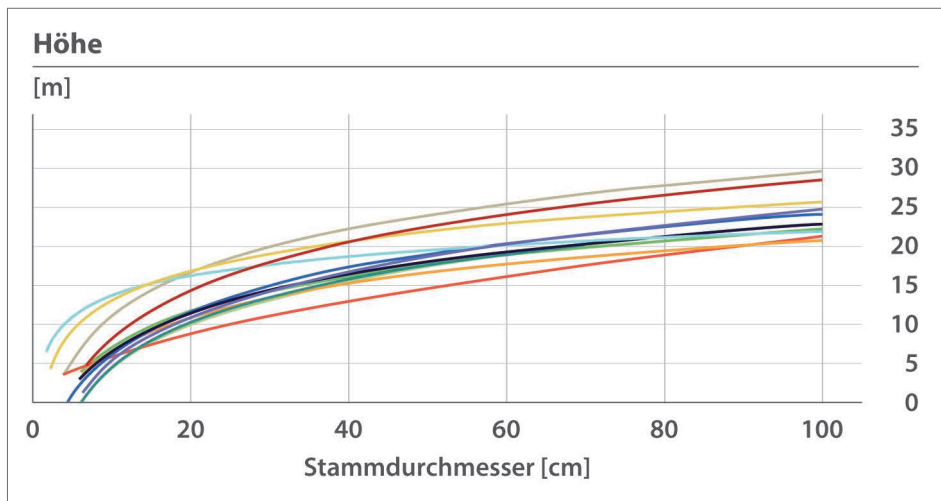
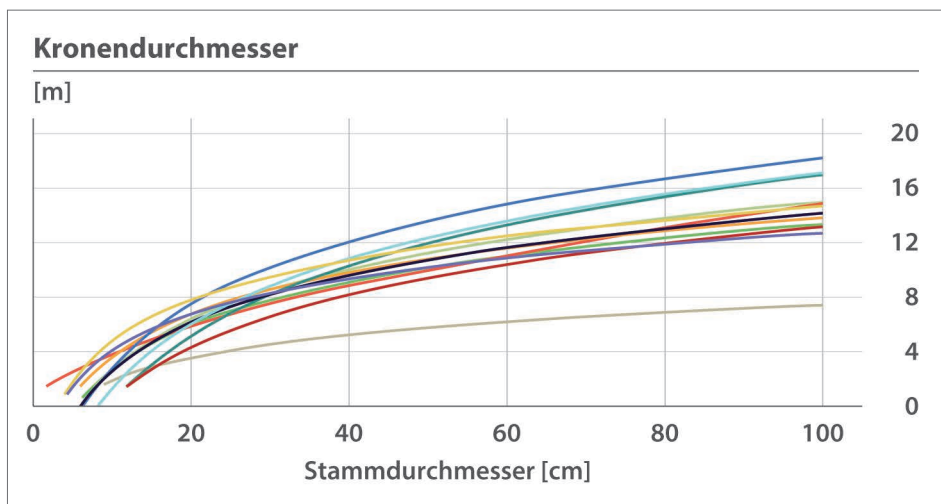


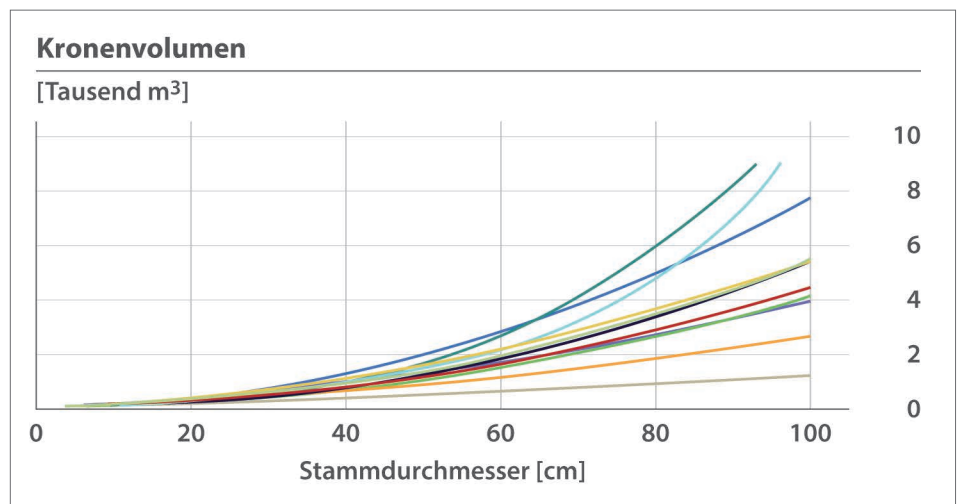
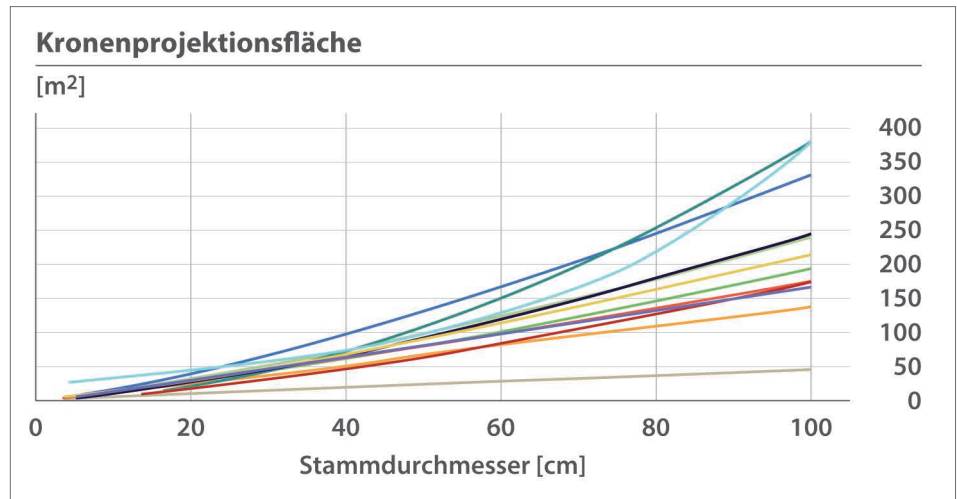
Abbildung 4
Strukturveränderungen
der Baumhöhe, des
Kronendurchmessers,
der Kronenprojektions-
fläche und des Kronen-
volumens von
12 Baumarten in
Abhängigkeit des
Stammdurchmessers



2. Dimensionsveränderungen

Die Dimensionen Baumhöhe, Kronenvolumen, Kronendurchmesser und Kronenprojektionsfläche sind vornehmlich von der Baumart und von der Größe bzw. dem Alter eines Baumes abhängig (Abbildung 4). Standörtliche Einflüsse auf die Dimension sind oft die Behinderung der Kronenausdehnung und der Höhenentwicklung durch angrenzende Bauten oder benachbarte Bäume. Die aufgeführten Abbildungen zeigen die baumartenspezifischen und altersabhängigen Veränderungen der einzelnen Dimensionen.

Bei allen Arten nehmen die Höhenentwicklung und die Kronendimensionen kontinuierlich mit dem Alter zu. Beispielsweise erreichen Platanen mit einem Stammdurchmesser von durchschnittlich 20 cm bereits eine Höhe von ca. 12 m; bei einem Stammdurchmesser von 80 cm sind sie durchschnittlich knapp 23 m hoch. Für die Kronendimension lassen sich vergleichbare Korrelationen feststellen: Eine Platane mit einem Stammdurchmesser von 20 cm hat durchschnittlich einen Kronendurchmesser von ca. 8 m, eine Kronenprojektionsfläche von 40 m² und ein Kronenvolumen



Bergahorn	Eiche	Platane	Säulenpappel
Birke	Gemeine Esche	Robinie	Spitzahorn
Buche	Hainbuche	Roskastanie	Winterlinde

von 325 m³. Mit 80 cm Stammdurchmesser kann ein Kronendurchmesser von ca. 17 m, eine Kronenprojektionsfläche von 249 m² und ein Kronenvolumen von knapp 5.000 m³ erreicht werden. Im Vergleich dazu weist eine Birke mit 20 cm Stammdurchmesser eine Baumhöhe von 15 m, einen Kronendurchmesser von 4 m, eine Kronenprojektionsfläche von 17 m² und ein Kronenvolumen von 182 m³ auf. Bei 80 cm Stammdurchmesser steigen die Höhe auf 27 m, der Kronendurchmesser auf 12 m, die Kronenprojektionsfläche auf 126 m² und das Kronenvolumen auf 2.819 m³ an.

Säulenpappeln werden von allen Arten am höchsten, zeigen jedoch nur geringe Kronendimensionen. Rosskastanien wiederum bleiben relativ klein, weisen aber größere Kronen auf. So erreichen 60-jährige Säulenpappeln eine Höhe von 25,6 m, während gleichaltrige Rosskastanien durchschnittlich nur 16,7 m hoch, d. h. knapp 35 % kleiner sind. Beim Kronendurchmesser erreicht eine 60-jährige Säulenpappel 6,2 m und eine gleichaltrige Kastanie 11,2 m (39 % größer). Die Krone einer 60-jährigen Platane kann sogar 18,9 m breit werden (54 % größer).



Quelle: Thomas Rötzer – Hofgarten in München



Das Wachstumsmodell City Tree

1. Übersicht

Wachstumsmodelle für Stadtbäume sind im Vergleich zu Modellen für die Simulation von Waldbeständen selten (Rötzer et al. 2017, Watt & Kirschbaum 2011). Die meisten Studien, die das Wachstum von Stadtbäumen beschreiben, basieren auf allometrischen Wachstumsbeziehungen, wie z. B. Peper et al. (2014) oder Moser et al. (2015). Auch existierende Modelle zur Simulation des Wachstums und der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen beruhen größtenteils auf statistischen Zusammenhängen (Rötzer et al. 2021a). Das Wachstumsmodell CityTree dagegen arbeitet prozessorientiert, d. h. biologische, physikalische und chemische Gleichungen bilden die Grundlage für die Simulationen. Für seine Entwicklung wurden mehr als 5.000 Individuen von 12 häufig in Städten des temperierten Klimas vorkommenden Stadtbaumarten vermessen.

Das Modell simuliert Wachstum und zahlreiche Ökosystemleistungen in Abhängigkeit vom Klima und der Umweltbedingungen für die Baumarten Spitzahorn, Bergahorn, Rosskastanie, Birke, Hainbuche, Buche, Gemeine Esche, Platane, Säulenpappel, Eiche, Robinie und Winterlinde. Damit ist ein Großteil der Baumarten, die in Städten der temperierten Klimazone anzutreffen sind, parametrisiert, was Simulationen zum Wachstum und den Ökosystemleistungen ermöglicht.

Eingangsparameter für die Simulation ist neben der Baumart der Stammdurchmesser in 1,3 m Höhe. Optional können auch die Baumhöhe, der Kronendurchmesser und die Kronenlänge eingegeben werden. Als Triebkräfte des Wachstums werden zusätzlich zur CO₂-Konzentration der Atmosphäre monatliche Werte der Strahlung, der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und des Niederschlags benötigt. Der Boden ist über die Feldkapazität, den permanenten Welkepunkt und die Durchwurzelungstiefe definiert. Als kleinräumige Umgebungsbedingungen können die Bodenversiegelung unter dem Baum sowie die Horizontüberhöhung eingegeben werden. Die Horizontüberhöhung beschreibt die gesamte auf einen Baum einfallende Strahlung. Ab der Modellversion 4.4 lassen sich das Wachstum und die Ökosystemleistungen von Stadtbäumen zudem unter Einbeziehung einer künstlichen Bewässerung simulieren.

Das Modell CityTree ist modular aufgebaut.
(Abbildung 5 und Abbildung 6, Seite 43)

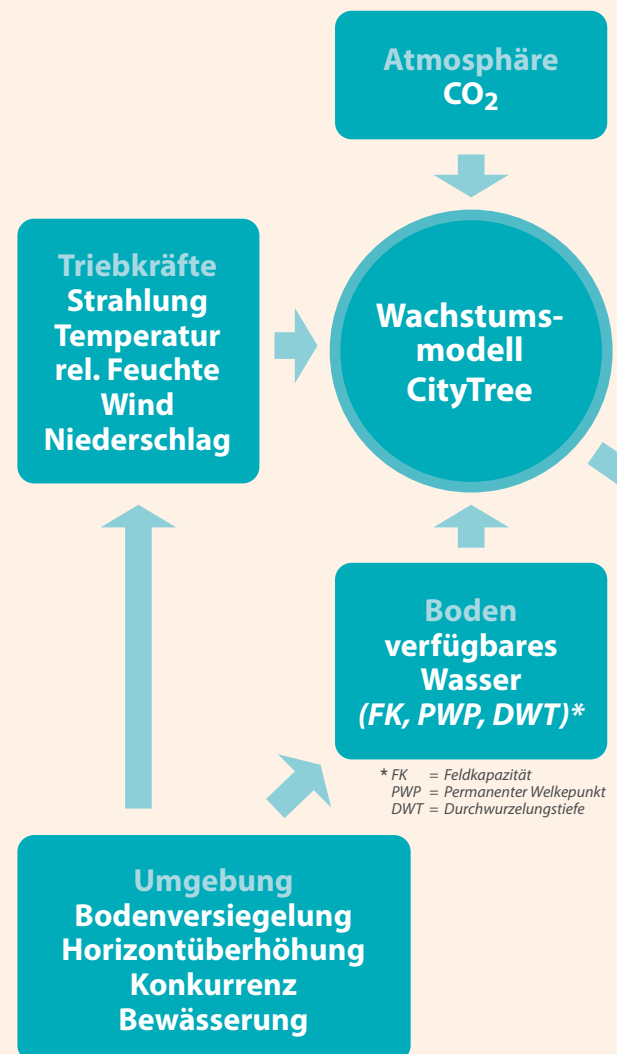


Abbildung 5
Das Modell CityTree und dessen Aufbau

Wachstumsmodell

CityTree



Baum
Art
Durchmesser
(Höhe,
Kronendimensionen)

Produktivität
Wachstum
Struktur
Wasserhaushalt

Wachstum über Zeit

Wuchsverhalten
Raumbesetzung
Ökosystemleistungen

Kohlenstoffbindung
Wasserverbrauch
Abflussreduktion
Beschattung
Kühlung

2. Die einzelnen Module

Im Modul **Klima** werden die einzelnen meteorologischen Parameter aufbereitet. Im Modul **Pflanzenentwicklung** wird vor allem der Jahresverlauf der Blattentwicklung simuliert. Auf dieser Basis können in weiteren Modulen die gesamte Wasserbilanz eines Baumes sowie die Photosynthese- und Respirationsleistung (Atmungsleistung) in monatlichen Schritten berechnet werden. Neben dem Wachstum und der Produktivität eines Baumes lassen sich auch der Wasserhaushalt, die Kohlenstoffspeicherung, die Beschattung und die Kühlungswirkung eines Baumes standortspezifisch abschätzen.

Im Modul **Wasser** lässt sich der Wasserhaushalt eines Einzelbaumes in Anlehnung an das Wasserhaushaltsmodell HYMO (Rötzer et al. 2004) bestimmen. Zusätzlich zur Messgröße Niederschlag müssen die Wasserbilanzelemente Interzeption, tatsächliche Evapotranspiration und Abfluss berechnet werden. Die monatliche Interzeption stellt eine Funktion des Blattflächenindex, der Interzeptionskapazität und des Niederschlags dar. Die tatsächliche Evapotranspiration wird in mehreren Teilschritten über die potenzielle Evapotranspiration nach Penman (DWA 2018) bestimmt. Hierzu wird ein Reduktionsfaktor auf Basis des Bodenwassergehalts des Vormonats, des aktuellen Monatsniederschlags, der potenziellen Verdunstung der Baumart und der nutzbaren Feldkapazität berechnet. Der Abfluss ist die Summe aus Oberflächenabfluss und Abfluss unterhalb der Durchwurzelungstiefe. Der Oberflächenabfluss wiederum wird über den prozentualen Anteil der Versiegelung an der Gesamtfläche und die Menge des auf die Oberfläche auftreffenden Niederschlagswassers bestimmt. Der Abfluss unterhalb der Durchwurzelungstiefe ergibt sich aus der Differenz von aktuellem Bodenwassergehalt und maximalen Bodenwassergehalt, wenn bei der Bilanzierung der aktuelle Bodenwassergehalt den maximalen Bodenwassergehalt überschreitet. Bei Wasserstress ist die Photosyntheseleistung der Blätter eingeschränkt, da über das Öffnen und Schließen der Stomata (Spaltöffnungen in der oberen Zellschicht) die Wasserabgabe an die Atmosphäre wie auch der interne CO₂-Partialdruck reguliert wird. Im Modell verknüpft ein Wasserstressfaktor das Modul Wasser mit dem Modul Photosynthese.

Im Modul **Photosynthese** wird die Nettoassimilation nach Haxeltine and Prentice (1996) berechnet, wozu

die monatlichen Mittelwerte bzw. Summen von Temperatur, Strahlung und Tageslänge sowie die CO₂-Konzentration der Atmosphäre herangezogen werden. Durch Abzug der Dunkelatmung ergibt sich aus der Bruttoassimilation die Nettoassimilation. Im Modul **Respiration** wird der Anteil der Wachstums- und der Erhaltungsatmung von der Nettoassimilation (= Bruttoprimärproduktion) subtrahiert, woraus sich die Nettoprimärproduktion des Baumes, d. h. der Gewinn an Kohlenstoff für das Wachstum, ergibt.

Im Modul **Allokation** wird der gewonnene Kohlenstoff, d. h. der Biomassezuwachs, auf die einzelnen Kompartimente der Pflanze verteilt. Zunächst wird der gesamte freie Kohlenstoff (= Non structural carbon, NSC) basierend auf dem aktuellen Kohlenstoffpool plus der Nettoprimärproduktion bestimmt. Anschließend wird der vorhandene Kohlenstoff in die Kompartimente Stamm, Äste, Blattmasse, Fein- und Grobwurzeln sowie in einen Anteil NSC allokiert, d. h. aufgeteilt. Dadurch lassen sich Baumdimensionen wie Stammvolumen, Kronenvolumen, Kronenprojektionsfläche, Baumhöhe sowie Stamm- und Kronendurchmesser berechnen.

Im Modul **Kühlung** wird die durch Verdunstung freigesetzte Energie aus der jährlichen Gesamt-Transpirationsmenge des Baumes und der latenten Energie des Phasenübergangs von flüssigem zu festem Wasser berechnet. Zudem lässt sich anhand des Kronenvolumens und der gesamten Blattfläche sowie der einfallenden Strahlung über das Lambert-Beersche Gesetz die Kühlungsleistung durch Beschattung bestimmen.

Im Modul **Beschattung** wird die Schattenfläche und die Schattendichte quantifiziert. Die Schattenfläche ist eine Funktion der Baumhöhe und des Kronendurchmessers. Die Schattendichte wird anhand der Blattfläche pro Kronenvolumen im Juni bestimmt.

Auf diese Weise lassen sich das Wuchsverhalten, die Raumbesetzung und zahlreiche Ökosystemleistungen von Bäumen in Abhängigkeit vom Klima und den Bodenbedingungen sowie den Umgebungsbedingungen simulieren: für das klimatische Mittel einer Stadt, für Klimaextreme wie trockene Jahre oder auch für bestimmte Klimaszenarien. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in Rötzer et al. (2019) zu finden.

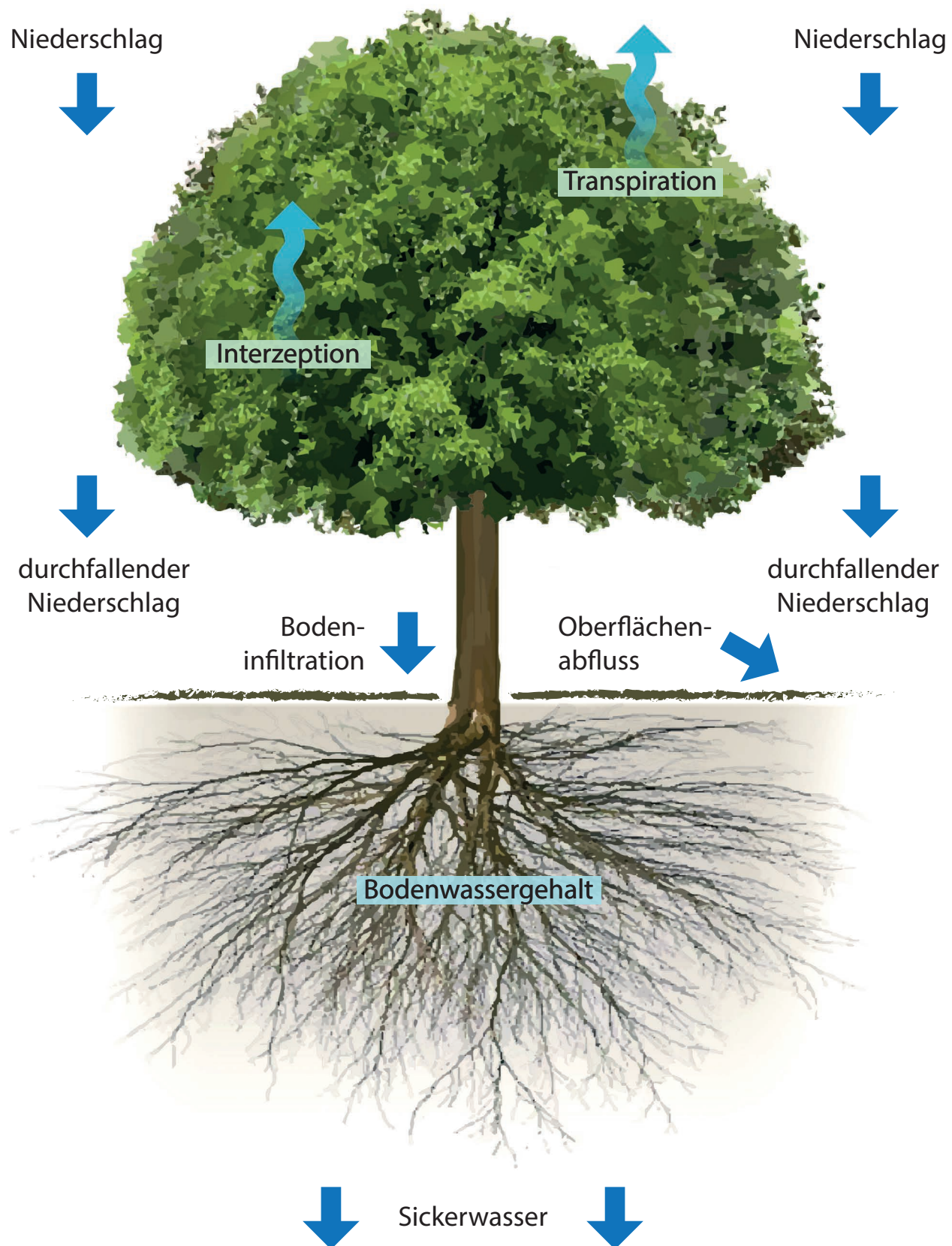


Abbildung 6
Schema des Moduls Wasserhaushalt



Quelle: Werner Lang – München, Olympiapark



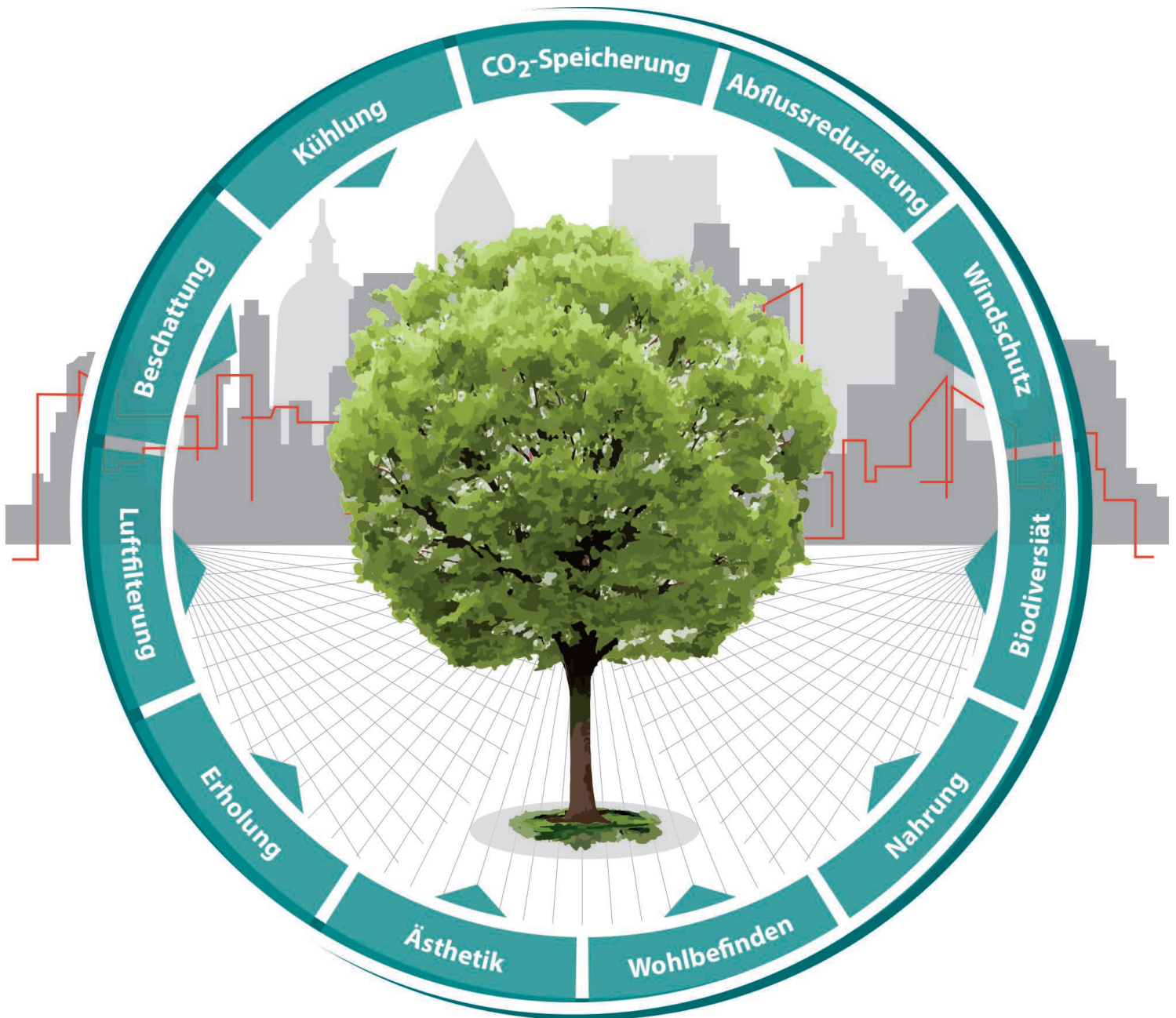
Stadtbäume erbringen neben ästhetischen Funktionen insbesondere vielfältige Leistungen für das lokale Klima wie die Regulierung des Wasserhaushalts, die Kohlenstoffspeicherung und die Abkühlung durch Beschattung und Verdunstung (Moser et al. 2018; Parsa et al. 2019) (Abbildung 7 und Tabelle 2, Seite 46 und Seite 47). Weitere wichtige Ökosystemleistungen sind der Erhalt von Biodiversität, Lärmschutz, Erholung und Luftreinigung (Roloff 2013; MEA 2005).

Neben dem Gesamtanteil der Grünflächen am Flächenangebot einer Stadt ist für die Erbringung von Ökosystemleistungen insbesondere die Ausprägung, Struktur und die Pflege des Grüns entscheidend. Aufgrund ihrer Größe und des großen Kronenvolumens spielen Bäume hier eine besondere Rolle. Im Hinblick auf Veränderungen des Stadtklimas durch den Klimawandel sind die klimaspezifischen regulierenden Leistungen wichtige Funktionen von Stadtbäumen. Diese sind u. a. die Kühlung durch Beschattung und Transpiration, die Speicherung von CO₂, die Abflussreduzierung oder der Windschutz.

Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in mitteleuropäischen Städten

1.

Ökosystemleistungen von Stadtbäumen



Urbanes Grün wie Stadtbäume, Hecken, Grasflächen, Dach- und Fassadenbegrünung ist ein wichtiger Bestandteil des Stadtbildes.

Abbildung 7
Ökosystemleistungen von Bäumen

„ Die Simulationen des interaktiven Leitfadens basieren auf dem prozessorientierten Wachstumsmodell CityTree

Die Erfassung und Modellierung des Baumwachstums und somit auch der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen sind wichtige Schritte hin zur quantitativen Erfassung des gesamten Grüns einer Stadt. Sie stellen eine bedeutende Informationsgrundlage für die Planung von Grünflächensystemen im urbanen Raum sowie für die Entwicklung einer Klimaanpassungsstrategie der Städte dar. Hierzu werden Modelle benötigt, die die Veränderungen des Wachstums und

der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen bei klein- und großräumigen Klima- und Standortsveränderungen abschätzen, um gegebenenfalls gegensteuern zu können. Die hier gezeigten Resultate basieren auf dem prozessorientierten Wachstumsmodell CityTree (Rötzer et al. 2019) und zeigen, wie unterschiedliche Klimabedingungen das Wachstum und die Ökosystemleistungen beeinflussen.

Unterstützend		• Primärproduktion • Nährstoffkreislauf • Biodiversität
Bereitstellend		• Nahrung • Holz und Biomasse • Wasser • Medizinische Ressourcen
Regulierend		• Kohlenstoffbindung • Abkühlung durch Evapotranspiration • Abkühlung durch Beschattung • Verbesserung der Luftqualität • Rückhaltung bzw. Reduktion des Niederschlagsabflusses • Lärm- und Windminderung
Kulturell		• Erholung • Ästhetik • Bildung • Spiritualität

Tabelle 2

Ökosystemleistungen von Stadtgrün (Auswahl)

Quelle: MEA, Millennium Ecosystem Assessment (2005)

2.

Basis der Simulationen

Städte

Das Klima einer Stadt hat einen enormen Einfluss auf das Wachstum und die Ökosystemleistungen eines Baumes. Neben der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Windgeschwindigkeit spielt vor allem die Strahlung eine tragende Rolle. Weiterhin ist die Niederschlagsmenge und deren Verteilung über das Jahr sehr wichtig. Tabelle 3 listet die 34 Städte

auf, die für den interaktiven Leitfaden ausgewählt wurden. Auswahlkriterien waren, dass in den Städten eine geeignete Klimastation des Deutschen Wetterdienstes mit einer hinreichend langen Zeitreihe vorhanden war und dass ein möglichst breiter klimatischer Gradient von Städten mit temperiertem Klima abgebildet werden konnte.



Abbildung 8
Ausgewählte Städte in Deutschland

	Stadt	Bundesland	Breite [°]	Länge [°]	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]
1	Augsburg	Bayern	48,4253	10,9417	9,0	746
2	Bad Kissingen	Bayern	50,2240	10,0792	9,4	667
3	Bamberg	Bayern	49,8743	10,9206	9,6	635
4	Bayreuth	Bayern	49,9666	11,5198	8,9	712
5	Berlin	Berlin	52,4675	13,4021	10,4	570
6	Cham	Bayern	49,1644	12,6175	8,6	699
7	Coburg	Bayern	50,3066	10,9679	9,1	690
8	Dresden	Sachsen	51,0221	13,8470	10,4	645
9	Düsseldorf	Nordrhein-Westfalen	51,2960	6,7686	11,0	904
10	Frankfurt a. M.	Hessen	50,0259	8,5213	11,1	598
11	Freiburg	Baden-Württemberg	48,0232	7,8343	11,5	874
12	Freising	Bayern	48,4024	11,6946	8,7	774
13	Garmisch-Partenkirchen	Bayern	47,4830	11,0621	7,7	1373
14	Hamburg	Hamburg	53,6332	9,9881	9,7	771
15	Hannover	Niedersachsen	52,4644	9,6779	10,0	627
16	Hof	Bayern	50,3123	11,8760	7,9	703
17	Kassel	Hessen	51,2963	9,4424	9,3	707
18	Kempten	Bayern	47,7233	10,3348	8,1	1222
19	Köln	Nordrhein-Westfalen	50,9894	6,9777	11,8	791
20	Leipzig	Sachsen	51,3151	12,4462	9,3	707
21	Lindau	Bayern	47,5776	9,7404	9,4	1522
22	Magdeburg	Sachsen-Anhalt	52,1029	11,5827	10,0	515
23	Mühlendorf	Bayern	48,2790	12,5024	8,9	809
24	München	Bayern	48,1632	11,5429	10,1	940
25	Nürnberg	Bayern	49,5030	11,0549	9,7	600
26	Regensburg	Bayern	49,0425	12,1019	9,4	657
27	Rosenheim	Bayern	47,8753	12,1280	9,4	1072
28	Rostock	Mecklenburg-Vorpommern	54,1803	12,0808	9,7	614
29	Schwandorf	Bayern	49,3278	12,0871	9,1	643
30	Straubing	Bayern	48,8275	12,5597	9,2	684
31	Stuttgart	Baden-Württemberg	48,8281	9,2000	10,8	649
32	Weiden	Bayern	54,1803	12,0808	8,7	700
33	Würzburg	Bayern	49,7704	9,9576	10,2	574
34	Zwiesel	Bayern	49,0280	13,2385	7,7	1046

Tabelle 3

Die geographische Lage und das Klima der Städte

Quelle: Klimadaten DWD (Deutscher Wetterdienst)

Baumarten und Stammdurchmesserklassen

Für die 12 Baumarten, die am häufigsten in mitteleuropäischen Städten des temperierten Klimas anzutreffen sind und zusammen über 60 % des städtischen öffentlichen Baumbestands ausmachen (Weller 2021), können Simulationen durchgeführt werden (Tabelle 1, Seite 33). Während Tabelle 1 die Toleranzen der Baumarten gegenüber Beschattung, Trockenheit und Staunässe zeigt, enthält Tabelle 4 Informationen zur Herkunft und Blattform, anhand derer die Baumarten leicht zu erkennen sind, sowie zu den Eigenschaften der einzelnen Baumarten.

Mit der Stammdurchmesserklasse ist die Größe des Baumes definiert. Hierbei ist der Durchmesser des Stammes auf Brusthöhe (d. h. auf 1,30 m) gemeint.

Es können Baumindividuen aus 10 Durchmesserklassen gewählt werden. Eine Klasse umfasst dabei eine Varianz von 10 cm (Abbildung 9). Der Durchmesser des Stammes eines Baumes korreliert eng mit dessen Alter und wird daher oft benutzt, um das Alter des Baumes abzuschätzen. Wie alt ein Baum ist, beeinflusst, wie schnell er wächst; üblicherweise werden höhere Wachstumsrate für jüngere Bäume gemessen.



Durchmesserklasse	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Spannbreite [cm]	<10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	>90

Abbildung 9
Stammdurchmesserklassen

Eigenschaften der ausgewählten Baumarten

Baumart wissenschaftlicher Name	Herkunft	Holzanatomie	Wurzeltyp	Kronenform	max. erreichte Höhe
Bergahorn <i>Acer pseudoplatanus</i>	Gebirge Europas und Westasiens	zerstreutporig	Herzwurzelsystem	riesig und dicht gewölbt, im Freiland oft breiter als hoch	25 m
Birke <i>Betula pendula</i>	Europa, Kleinasien, Kaukasus, Nordpersien	zerstreutporig	flaches Wurzelsystem	schlank	20 m
Buche <i>Fagus sylvatica</i>	Europa	zerstreutporig	Herzwurzelsystem	jung: schlank, kegelförmig; alt: Kuppelkrone	30 m
Eiche <i>Quercus robur</i>	Europa, Kleinasien	ringporig	Pfahlwurzelsystem	breit und unregelmäßig gewölbt	30 m
Gemeine Esche <i>Fraxinus excelsior</i>	Europa, Kleinasien, Nordafrika, Mittlerer Osten	ringporig	Herzwurzelsystem	hochgewölbt und offen	30 m
Hainbuche <i>Carpinus betulus</i>	Europa, Balkan, Kaukasus, Nordpersien	zerstreutporig	Herzwurzelsystem	unregelmäßig eiförmig oder kegelförmig	20 m
Platane <i>Platanus x acerifolia</i>	England (Kreuzung)	zerstreutporig	Herzwurzelsystem	eiförmig bis kugelförmig	30 m
Robinie <i>Robinia pseudoacacia</i>	östliches Nordamerika	ringporig	Pfahlwurzel, die ins Herzwurzelsystem übergeht	schlank und säulenförmig in engen Straßen bis kugelförmig bei ausreichend Platz	30 m
Rosskastanie <i>Aesculus hippocastanum</i>	Balkan, Mitteleuropa	zerstreutporig	Pfahlwurzel, die ins Herzwurzelsystem übergeht	halbellipsoid	25 m
Säulenpappel <i>Populus nigra</i> ‚Italica‘	Italien	zerstreutporig	Flachwurzelsystem	schlank pyramidal/ schmal säulenförmig	30 m
Spitzahorn <i>Acer platanoides</i>	Europa, Kleinasien und Nordpersien	zerstreutporig	Herzwurzelsystem	eiförmig bis kugelförmig	20 m
Winterlinde <i>Tilia cordata</i>	Europa	zerstreutporig	Pfahlwurzel, die ins Herzwurzelsystem übergeht	eiförmig	30 m

Tabelle 4

Eigenschaften der ausgewählten Arten

Quelle: Mitchell 1979; Franceschi et al 2022; GALK 2018; Roloff 2013; Telewski et al. 1996

Bodenart und Bodenversiegelung

Der Boden spielt vor allem für den Wasser- und Nährstoffhaushalt der Bäume eine entscheidende Rolle. Der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt beeinflusst den Wasserverbrauch der Bäume und damit auch das Wachstum und die Ökosystemleistungen. Er wird über die Feldkapazität und den permanenten Welkepunkt einer Bodenart definiert. Dabei ist die Feldkapazität die Menge an Wasser, die ein Boden nach zwei bis drei Tagen noch halten kann, nachdem er zuvor vollständig mit Wasser gesättigt war. Der permanente Welkepunkt ist der Wassergehalt, unterhalb dem Pflanzen dem Boden kein Wasser mehr

entziehen können. Tabelle 5 zeigt die im interaktiven Leitfaden hinterlegten Werte für sechs Bodenarten.

Die Bodenversiegelung beschreibt die wasserundurchlässige Bodenoberfläche. Die prozentuale Bodenversiegelung bezieht sich auf die Fläche unterhalb des betrachteten Baumes. Dabei wird davon ausgegangen, dass der Baum in einem Umkreis, der dem 1,5-fachen seiner Kronenprojektionsfläche entspricht, über seine Wurzeln sowie über den lateralen Wasserfluss im Boden Bodenwasser aufnehmen kann (Abbildung 10).

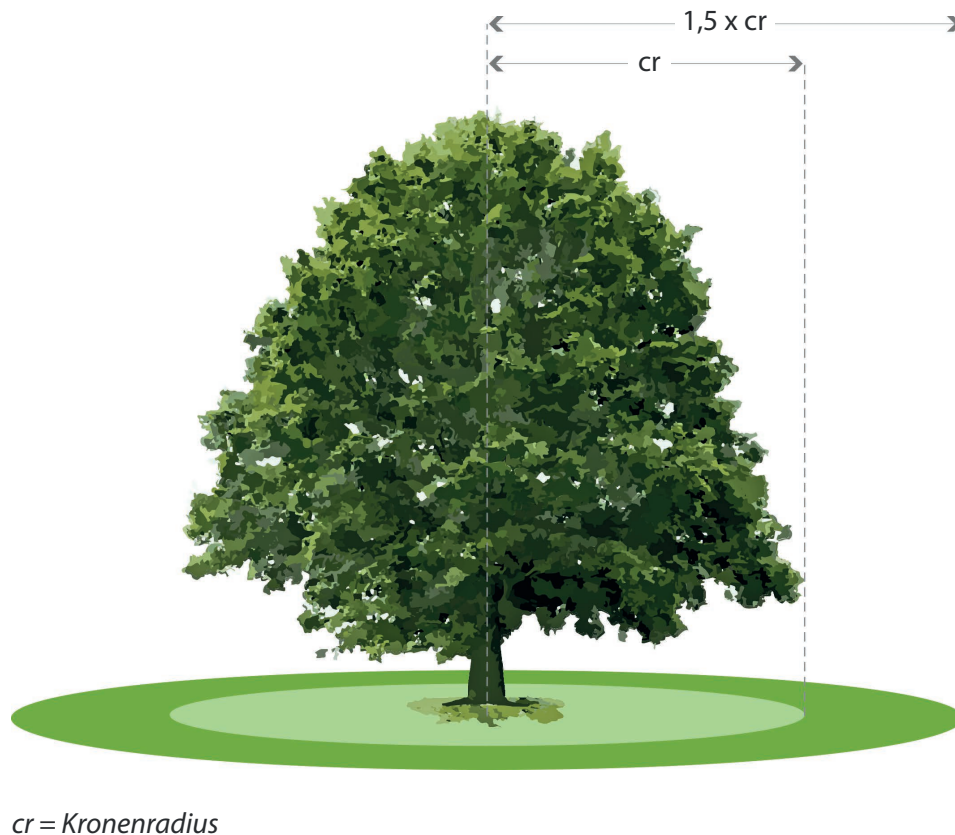


Abbildung 10

Bodenversiegelung um den Baumstandort

Folgende Bodenarten sind im Modell hinterlegt

Bodenart	Sand	lehmgiger Sand	sandiger Lehm	Lehm	Löss	Ton
Feldkapazität¹ [Vol.-%]	13,5	21	25	35	37	42
Welkepunkt² [Vol.-%]	6	6	8	15	13	20

¹ Die Feldkapazität ist die Menge an Wasser, die ein Boden nach 2-3 Tagen noch halten kann, nachdem er zuvor vollständig mit Wasser gesättigt war.

² Der Welkepunkt ist der Wassergehalt, unter dem Pflanzen dem Boden kein Wasser mehr entziehen können.

Tabelle 5

Bodenarten und deren Eigenschaften

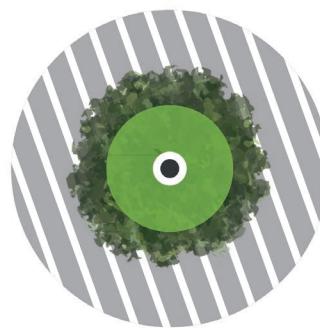
Quelle: Bodenkundliche Kartieranleitung (1996): Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland. (1996). Bodenkundliche Kartieranleitung. Schweizerbart.

Beispiele von Bodenversiegelung:

Unversiegelter Boden
Versiegelungsgrad: 0 %



Versiegelter Boden
Versiegelungsgrad: 64 %



Standort Baum



unversiegelter Boden



versiegelter Boden

Horizontabdeckung und Zeiträume

Der Grad der Horizontüberhöhung (Sky View Faktor, SVF) ist ein dimensionsloser Parameter zwischen 0 und 1,0. Der Sky View Faktor beschreibt, wie viel vom Himmel an einem Standort sichtbar ist (Abbildung 11). Ein hoher Anteil offenen Himmels bedeutet ein hohes Maß an direkter Sonnenstrahlung auf

einen Baum, die für dessen Wachstum wesentlich ist. Eine Horizontüberhöhung von 0 bedeutet, dass die gesamte obere Hälfte des Himmels nicht sichtbar ist, eine Horizontüberhöhung von 1,0, dass die gesamte obere Hälfte des Himmels sichtbar ist.

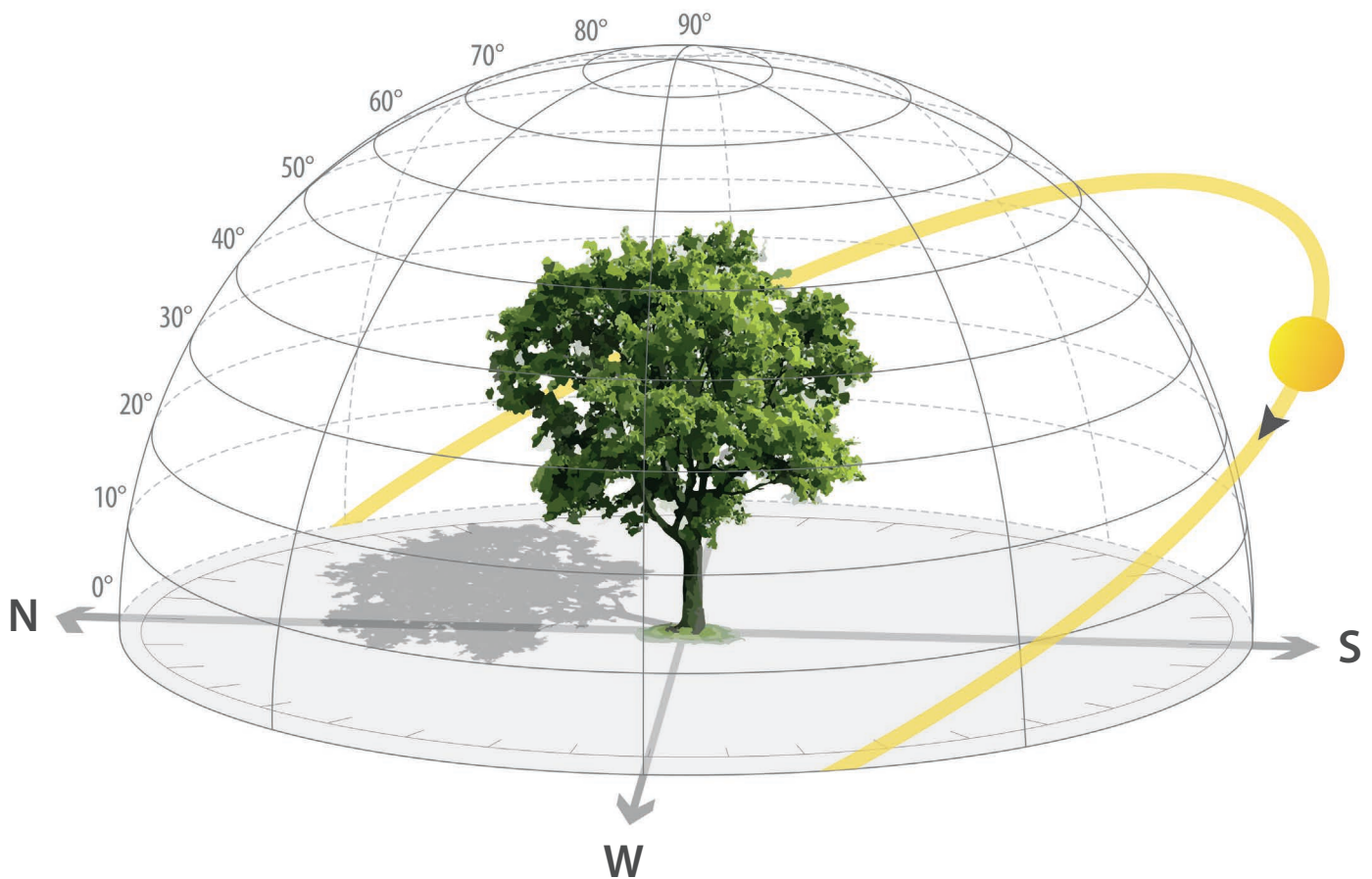


Abbildung 11

Horizontabdeckung:

SVF = 0: die gesamte obere Hälfte des Himmels ist nicht sichtbar

SVF = 1,0: die gesamte obere Hälfte des Himmels ist sichtbar



*Der interaktive Leitfaden
kann Simulationen
für vier Zeiträume durchführen*

1. | **Langjähriges Mittel**
(1991-2020)
2. | **Trockenjahr**
(2003)
3. | **Klimaszenario RCP 2.6 ferne Zukunft**
(2081-2090)
4. | **Klimaszenario RCP 8.5 ferne Zukunft**
(2081-2090)

Das langjährige Mittel umfasst den Zeitraum der Jahre 1991 bis 2020. Damit können das durchschnittliche Wachstum eines Baumes und seine mittleren Ökosystemleistungen bestimmt werden.

2003 war europaweit eines der stärksten Trockenjahre innerhalb der letzten 50 Jahre. Die meteorologischen Zeitreihen der einzelnen Städte aus diesem Jahr sind deshalb geeignet, um das Wachstum und die Ökosystemleistungen eines Baumes für ein Trockenjahr aufzuzeigen.

Um auch das Wachstum und die Ökosystemleistungen von Bäumen unter künftigen Klimabedingungen simulieren zu können, wurde Zeitreihen der Klimaszenario RCP 2.6 und 8.5 für die Periode 2081-2090

aufbereitet. Datengrundlage für die Klimaszenarien ist das *Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)*, das konsistente Sätze von Klimawirkungsdaten über Sektoren und Skalen hinweg zur Verfügung stellt. ISIMIP dient als Grundlage für Klimamodellevaluationen und ermöglicht verbesserte Abschätzungen der biophysikalischen und sozioökonomischen Auswirkungen des Klimawandels für verschiedene Stufen der globalen Erwärmung. Zudem sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Auswirkungen des Klimawandels über verschiedene Sektoren hinweg durch konsistente Szenarien berücksichtigt. Die Szenarien decken die globale Landfläche auf einem 0,5° x 0,5°-Gitter ab und sind über www.isimip.org verfügbar (PIK 2017).

Stadt	1991-2020		2003		RCP 2.6 2081-2090		RCP 8.5 2081-2090	
	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Temperatur [°C]	Niederschlag [mm]
1 Augsburg	9,0	749	8,7	530	11,7	806	15,9	768
2 Bad Kissingen	9,4	669	9,7	471	11,9	686	15,8	673
3 Bamberg	9,6	637	9,8	455	12,1	654	16,0	629
4 Bayreuth	8,9	714	9,0	560	11,4	737	15,4	710
5 Berlin	10,4	574	10,1	456	12,9	605	16,5	581
6 Cham	8,6	702	8,3	540	11,0	720	15,2	681
7 Coburg	9,1	692	9,4	536	12,2	714	15,5	693
8 Dresden	10,4	648	10,2	341	13,0	666	16,7	650
9 Düsseldorf	11,0	755	11,3	569	13,5	826	16,9	743
10 Frankfurt a. M.	11,1	602	11,4	383	13,6	616	17,4	593
11 Freiburg	11,5	877	12,6	628	14,2	902	18,1	845
12 Freising	8,7	777	8,7	527	11,2	798	15,4	758
13 Garmisch-Partenkirchen	7,7	1374	7,8	1120	10,1	1384	14,4	1223
14 Hamburg	9,7	775	9,5	571	12,3	753	15,7	729
15 Hannover	10,0	631	9,9	515	12,5	627	15,9	605
16 Hof	7,9	706	8,0	546	10,4	722	14,3	691
17 Kassel	9,3	710	9,6	517	11,7	756	15,4	728
18 Kempten	8,1	1224	8,2	1017	10,6	1250	14,9	1113
19 Köln	11,8	795	12,5	663	14,3	867	17,8	770
20 Leipzig	9,3	710	10,4	431	11,9	736	15,6	756
21 Lindau	9,4	1525	9,3	1263	11,9	1568	16,2	1367
22 Magdeburg	10,0	518	9,7	404	12,6	533	16,1	495
23 Mühldorf	8,9	811	8,7	589	11,3	836	15,6	786
24 München	10,1	942	10,2	660	12,6	967	16,8	912
25 Nürnberg	9,7	604	9,8	417	12,2	617	16,2	593
26 Regensburg	9,4	659	9,5	450	11,9	678	16,0	655
27 Rosenheim	9,4	1073	9,5	788	11,8	1086	16,2	991
28 Rostock	9,7	619	9,7	483	12,2	628	15,8	582
29 Schwandorf	9,1	645	9,3	477	11,6	664	15,7	640
30 Straubing	9,2	686	9,0	492	11,6	715	15,9	679
31 Stuttgart	10,8	652	11,2	495	13,5	658	17,4	649
32 Weiden	8,7	702	8,8	540	11,1	712	15,1	689
33 Würzburg	10,2	577	10,5	414	12,7	591	16,5	566
34 Zwiesel	7,7	1047	8,7	905	10,1	1084	14,3	1083

Tabelle 6

Jahresmitteltemperatur und Jahressummen des Niederschlags der ausgewählten Städte im langjährigen Mittel (1991-2020), für das Trockenjahr 2003 sowie für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der Jahre 2081-2090

Quelle: Baek et al. 2013; Moss et al. 2010; van Vuuren et al. 2011

Die vier bestehenden Szenario-Realisierungen

1. **RCP 2.6**
ein Spitzenwert von ca. 3 W m^{-2} wird Mitte des Jahrhunderts erreicht, gefolgt von einem Rückgang auf $2,6 \text{ W m}^{-2}$ bis 2100
2. **RCP 4.5**
Stabilisierungen des globalen Strahlungsantriebs ohne Überschwingungen bei $4,5 \text{ W m}^{-2}$ in 2100
3. **RCP 6.0**
Stabilisierungen des globalen Strahlungsantriebs ohne Überschwingungen bei 6 W m^{-2} in 2100
4. **RCP 8.5**
Anstieg des globalen Strahlungsantriebs bis zu $8,5 \text{ W m}^{-2}$ in 2100

Es gibt vier Szenario-Realisierungen basierend auf den Representative Concentration Pathway (RCP)-Emissionsszenarien, die durch den globalen Strahlungsantrieb bis zum Jahr 2100 charakterisiert sind.

Quelle: Baek et al. 2013; Moss et al. 2010; van Vuuren et al. 2011

Die verwendeten Klimaszenarien beruhen auf den Simulationsläufen der HadGEM2-Modellfamilie, die eine aktualisierte Version des HadGEM1-Modells (Johns et al. 2006) und seiner Konfigurationen ist. Für die Simulationen wurden aus dem $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -Gitter der Klimaszenarien die Klimazeitreihen erschlossen, die die geringste Entfernung zu der jeweiligen Stadt besitzen. Da auch hier Abweichungen bei den einzelnen Klimaparametern aufgrund der Entfernungs- und Höhenunterschiede auftraten, wurden zusätzliche Zeitreihen für das gegebene Klima (1991-2020), berechnet auf Basis der Klimamodelle, herangezogen, um die Zeitreihen der RCP-Klimaszenarien an die jeweilige Stadt anzupassen.

Klar zu erkennen sind die starken Rückgänge der Niederschläge im Trockenjahr 2003. In Städten wie Dresden, Frankfurt (Main), Leipzig, Nürnberg oder Regensburg war der Niederschlag um über 30 % reduziert. Im Mittel über alle Städte lag der Niederschlag

im Jahr 2003 um 26 % unter der Niederschlagssumme des Mittels von 1991 bis 2020. Die 10-jährigen Mittel der Klimaszenarien zeigen dagegen lediglich Reduktionen des Niederschlags um bis zu 11 % gegenüber dem langjährigen Mittel.

Anders bei den Temperaturen: Hier liegt der Anstieg der Jahresmitteltemperatur bei den Klimaszenarien mit $2,5^\circ \text{C}$ (RCP 2.6) bzw. $6,5^\circ \text{C}$ (RCP 8.5) deutlich über den Mittelwerten von 1991-2020. Der Anstieg der Jahresmitteltemperatur im Trockenjahr 2003 gegenüber 1991-2020 ist mit $0,2^\circ \text{C}$ dagegen marginal.

3.

Simulationen zum Einfluss der Baumart

Nachfolgend ist dargestellt, wie der Standort und das Klima das Wachstum (d. h. die Biomassebildung) und die Ökosystemleistungen (d. h. die CO₂-Fixierung, die Abflussreduzierung, die Wasserspeicherung sowie die Kühlung durch Beschattung und Transpiration) verschiedener Stadtbaumarten beeinflussen. Die Ergebnisse werden für die 12 Stadtbaumarten im Mittel über alle Städte gezeigt, teilweise

sind Wachstum und Ökosystemleistungen auch beispielhaft für einzelne Städte und Baumarten dargestellt. Spezifische Auswertungen für einzelne Städte, Baumarten, Bodenarten und Zeitperioden sowie für ausgewählte Baumgrößen, Bodenversiegelungen und Horizontüberhöhungen können über den interaktiven Leitfaden generiert werden (www.zsk.tum.de).

Biomassezuwachs

Aus Abbildung 12 ist ersichtlich, dass der durchschnittliche Biomassezuwachs zwischen 10,2 kg pro Baum und Jahr bei der Säulenpappel und bis zu 43,4 kg pro Baum und Jahr bei der Robinie schwankt (Stammdurchmesserklasse 50-60 cm). Insgesamt beträgt der mittlere Biomassenzuwachs aller Baumarten in allen Städten 30,9 kg pro Baum pro Jahr.

30,9 kg

Biomassezuwachs

[kg / Baum / Jahr]

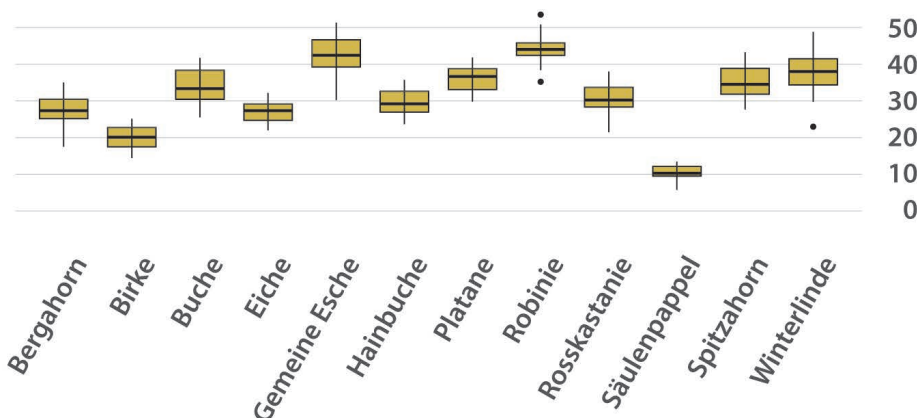


Abbildung 12

Biomassezuwachs der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

Das Wachstum und die Ökosystemleistungen für die 12 am häufigsten in mitteleuropäischen Städten anzutreffenden Baumarten sind in den Abbildungen 12 bis 16 dargestellt, gemittelt über alle Städte.



56,7_{kg}

CO₂-Fixierung

In Abbildung 13 ist die CO₂-Speicherung aller Arten dargestellt. Ähnlich wie beim Biomassezuwachs zeigen die Arten unterschiedliche Ausprägungen ihrer Leistungen. Während die Gemeine Esche (77,1 kg) und die Robinie (80,4 kg) die höchsten CO₂-Fixierungen aufweisen, befinden sich die Säulenpappel (18,7 kg) und die Birke (36,3 kg) im unteren Leistungsbereich, d. h. sie fixieren die geringsten CO₂-Mengen pro Baum pro Jahr. Die mittlere CO₂-Fixierung aller Arten für die Stammdurchmesserklasse 50 - 60 cm ist 56,7 kg CO₂ pro Baum und Jahr.

CO₂-Fixierung

[kg CO₂ / Baum / Jahr]

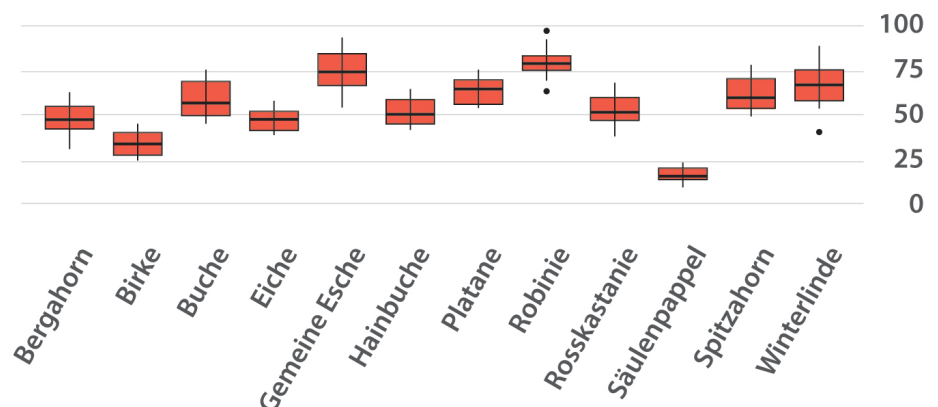


Abbildung 13

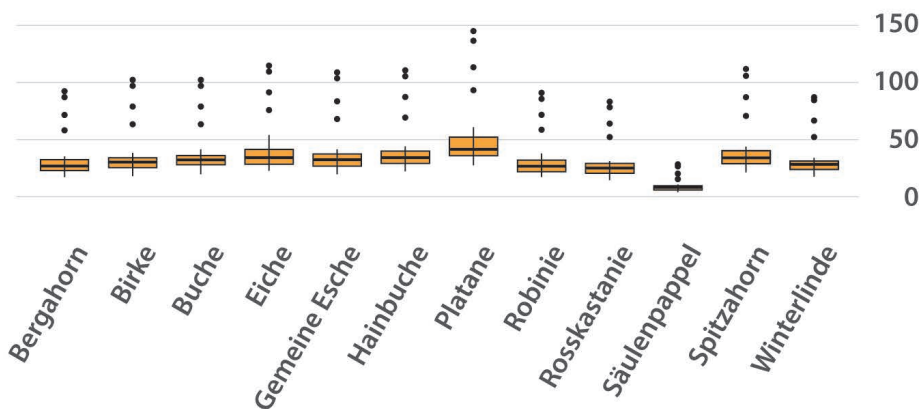
CO₂-Fixierung der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont einschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

Abfluss

Abbildung 14 stellt die über alle Städte gemittelten Werte des Abflusses unter der jeweiligen Baumart dar. Es zeigt sich, dass die Säulenpappel mit im Mittel 9,8 m³ Abfluss pro Baum pro Jahr deutlich weniger Niederschlag abpuffern kann als eine Platane (Mittel 53,1 m³) oder eine Eiche (Mittel 42,5 m³). Das Mittel aller Arten und Städte liegt bei 36,1 m³ Abfluss pro Jahr unter dem Baum.

Abfluss

[m³ / Baum / Jahr]



36,1 m³

Abbildung 14

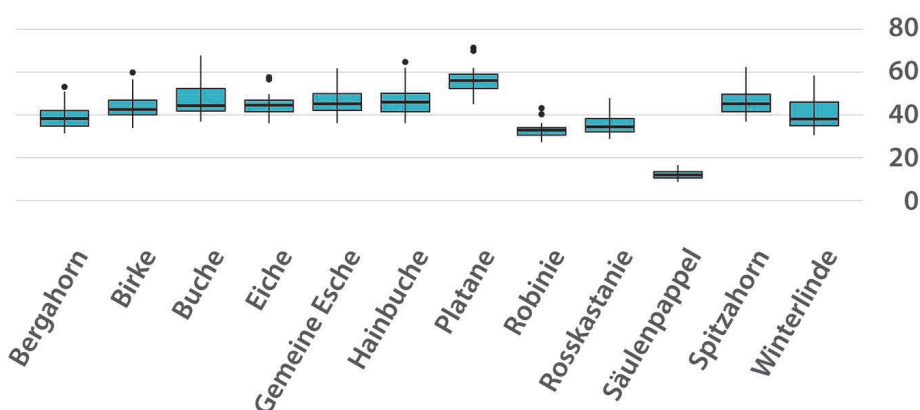
Abfluss unter den Bäumen der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont-einschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

Wasserverbrauch

Auch für den Wasserverbrauch der Baumarten, d. h. für die gesamte Verdunstung während des Jahres, zeigt sich ein differenziertes Bild (Abbildung 15). So gibt es Arten wie die Platane, die mit 55,9 m³ Jahresverdunstung einen hohen Wasserverbrauch aufweisen. Dem stehen Arten wie die Säulenpappel gegenüber, die mit 12,3 m³ einen signifikant niedrigeren Wasserverbrauch haben. Im Mittel über alle Baumarten und Städte beträgt der Wasserverbrauch eines Baumes der Stammdurchmesserklasse 50 - 60 cm 41,0 m³ pro Jahr.

Wasserverbrauch

[m³ / Baum / Jahr]



41,0 m³

Abbildung 15

Wasserverbrauch der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont-einschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

Kühlungsenergie

In Abbildung 16 ist die Kühlungsenergie durch Beschattung und Transpiration im Sommer für alle 12 Baumarten im Mittel der Städte dargestellt. Höchste Werte wurden für die Gemeine Esche mit 54.372 kWh und die Platane mit 57.881 kWh simuliert, während die Säulenpappel mit 13.086 kWh die geringste Kühlungsenergie aufweist. Die durchschnittliche Kühlungsenergie aller Baumarten in der Stammdurchmesserklasse 50-60 cm liegt bei 43.601 kWh.

Kühlungsenergie

[Tausend kWh / Baum / Sommer*]

43.601
kWh

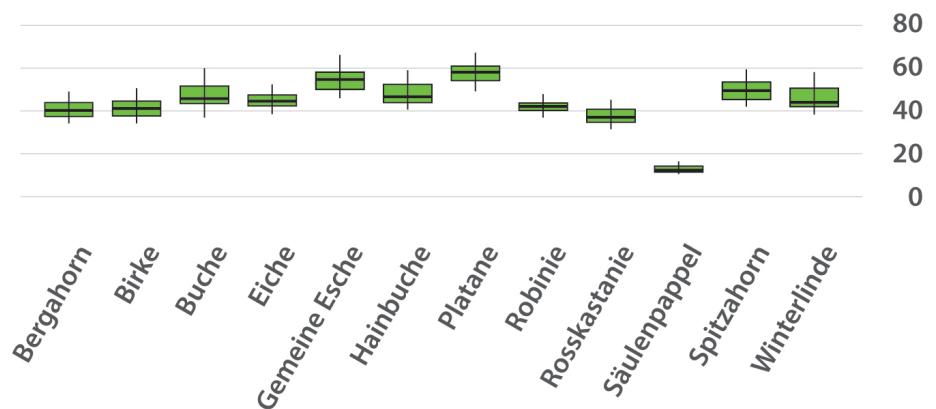


Abbildung 16

Sommerliche Kühlungsenergie durch Beschattung und Transpiration der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

* Sommer: Juni - August



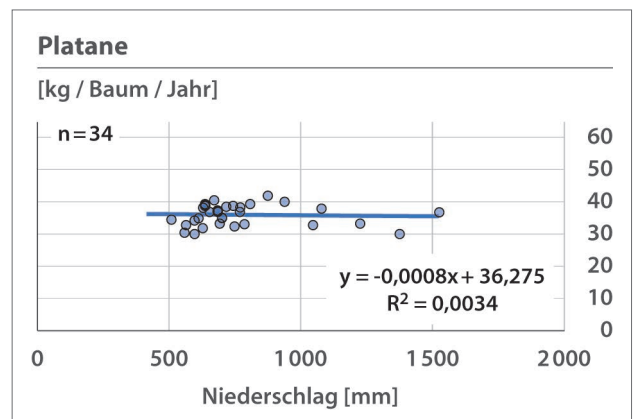
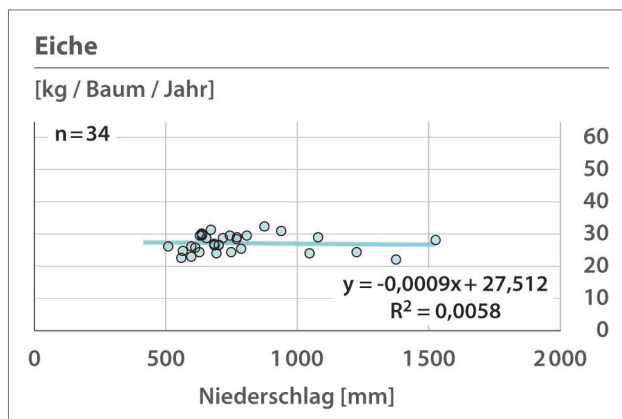
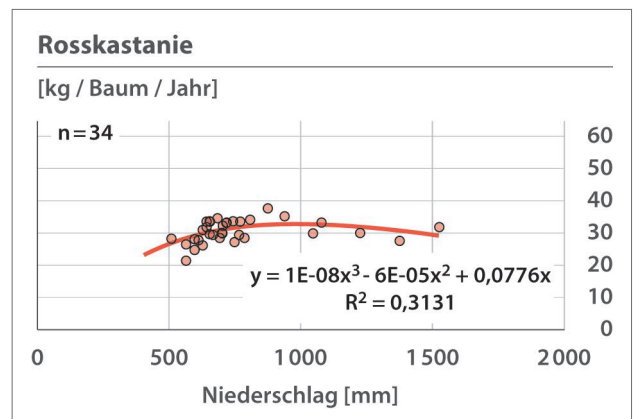
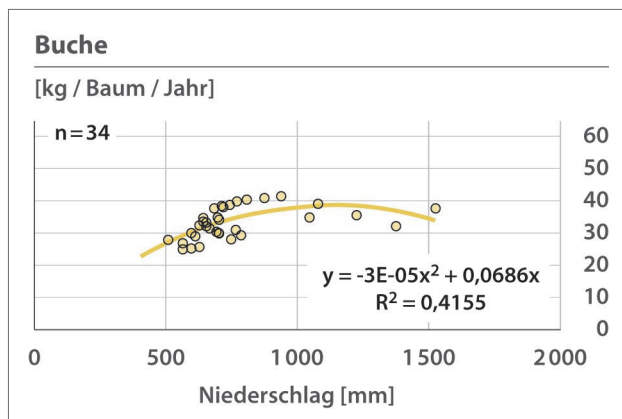
4.

Simulationen zum Einfluss des Standorts und des Klimas

Je nach Standort bzw. Stadt unterscheidet sich das Klima zum Teil erheblich. Für das Wachstum und die Ökosystemleistungen der Bäume sind insbesondere der Niederschlag und seine Verteilung im Jahresverlauf relevant. Während beispielsweise Berlin einen durchschnittlichen Jahresniederschlag von 570 mm

aufweist, fallen in München durchschnittlich 940 mm Niederschlag und in Kempten 1.222 mm (DWD 2024).

Abbildung 17 zeigt beispielhaft für sechs Baumarten, wie der Biomassezuwachs von der Niederschlags-summe beeinflusst wird.



Baumarten wie die Winterlinde und die Buche werden stark von den Niederschlägen beeinflusst, wie der deutliche Anstieg des Biomassezuwachses im Bereich von 500 mm bis 1000 mm Niederschlag zeigt. Erst bei darüber liegenden Niederschlagsmengen ist keine weitere Erhöhung des Zuwachses mehr

zu erwarten. Bei Baumarten wie Platane, Robinie und Eiche nimmt hingegen der Biomassezuwachs mit steigenden Niederschlägen nicht zu.

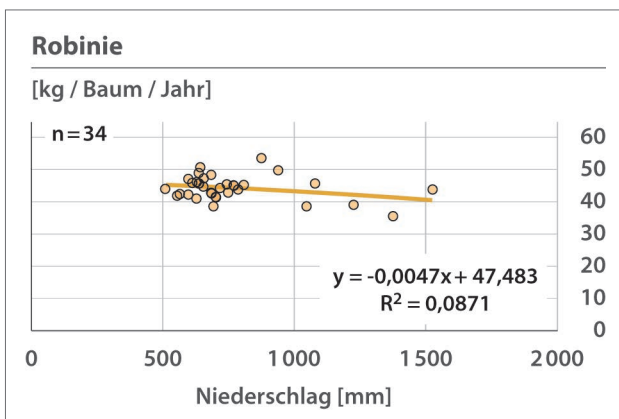
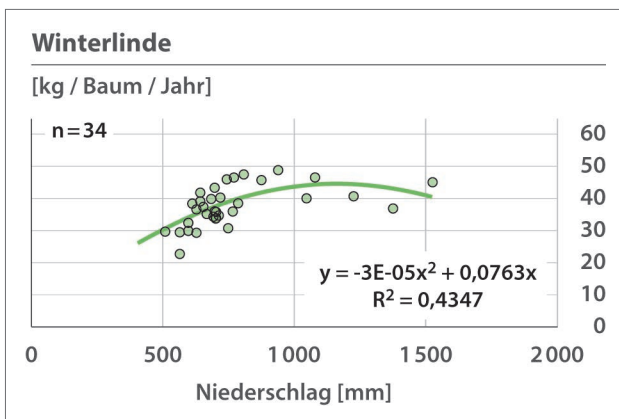


Abbildung 17

Abhängigkeit des Biomassezuwachses von der Niederschlagssumme eines Standorts für sechs Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont einschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

In Abbildung 18 ist dargestellt, in welchem Maße der Biomassezuwachs der Winterlinde und der Robinie von der Aridität (Trockenheit) eines Standorts abhängt. Als Index hierfür wurde das Verhältnis von tatsächlicher zu potenzieller Verdunstung verwendet. Dabei zeigt ein Wert von 1,0 an, dass keine Trockenheit vorherrscht, während sie mit geringeren Werten zunimmt.

Klar erkennbar ist, dass mit zunehmender Trockenheit, d. h. niedrigerem Index, der Biomassezuwachs stark abnimmt. Gut zu sehen ist ferner, dass ab einem Index von 0,8 keine weiteren Wachstumszunahmen

verzeichnet sind; d. h., dass ab diesem Wert ausreichend Wasser für eine hohe Produktivität vorhanden ist. Die Zusammenhänge von Biomassezuwachs und Trockenheit eines Standorts sind für Winterlinden eindeutiger ausgeprägt (Bestimmtheitsmaß 0,79) als für Robinien (Bestimmtheitsmaß 0,19).

Um die klimatischen Standorteinflüsse weiter zu verdeutlichen, wurden die Biomassezuwächse für zwei Städte mit unterschiedlichem Niederschlagsniveau verglichen (Abbildung 19). In München erreichen alle Baumarten durchschnittlich einen Biomassezuwachs

Biomassezuwachs

[kg / Baum / Jahr]

n=34

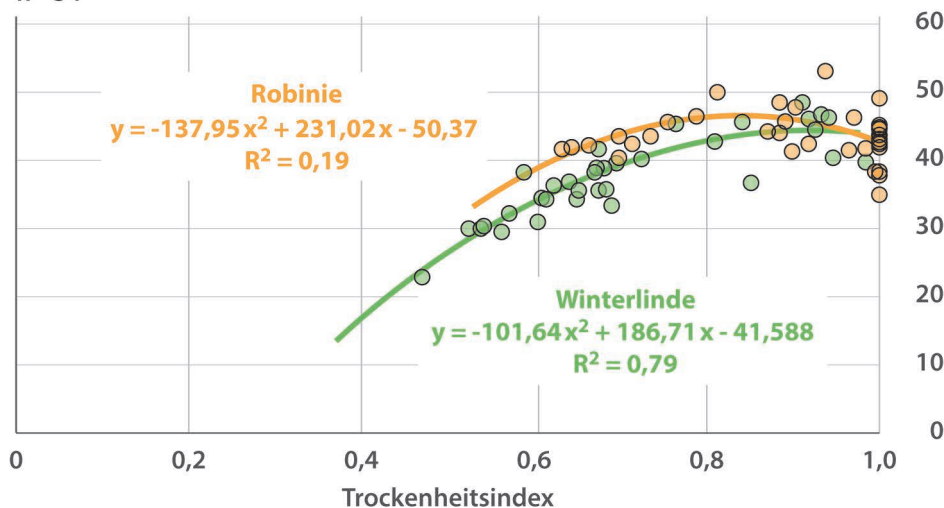


Abbildung 18

Abhängigkeit des Biomassezuwachses von der Aridität (Trockenheit) eines Standorts für Winterlinden und Robinien (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont einschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

von 36,8 kg pro Jahr und Baum, während in Berlin der Zuwachs im Mittel 23,4 kg pro Jahr und Baum beträgt. Die stärksten Zuwächse wurden in beiden Städten jeweils für die Robinie und die Gemeine Esche ermittelt, allerdings in umgekehrter Reihenfolge: In Berlin beträgt der Zuwachs für die Robinie 41,8 kg und für die Gemeine Esche 29,8 kg, in München für die Gemeine Esche 51,0 kg und für die Robinie 49,3 kg. Auch die Baumart mit dem geringsten Biomassezuwachs pro Jahr und Baum ist in beiden Städten dieselbe, nämlich die Säulenpappel (5,5 kg in Berlin und 13,2 kg in München).

Der Einfluss der Baumart und des Standorts auf den Zuwachs ist sehr markant; teilweise wurden für Berlin und München enorme Zuwachsunterschiede zwischen den einzelnen Arten aufgedeckt. Beispielsweise hat die Winterlinde in München mehr als doppelt so viel Zuwachs wie in Berlin (48,6 kg gegenüber 22,6 kg). Generell war der Zuwachs bei den meisten Baumarten in München deutlich höher als in Berlin. Ausnahmen sind der Bergahorn und die Gemeine Esche, die in Berlin geringfügig höhere Zuwächse als in München aufweisen.

Biomassezuwachs

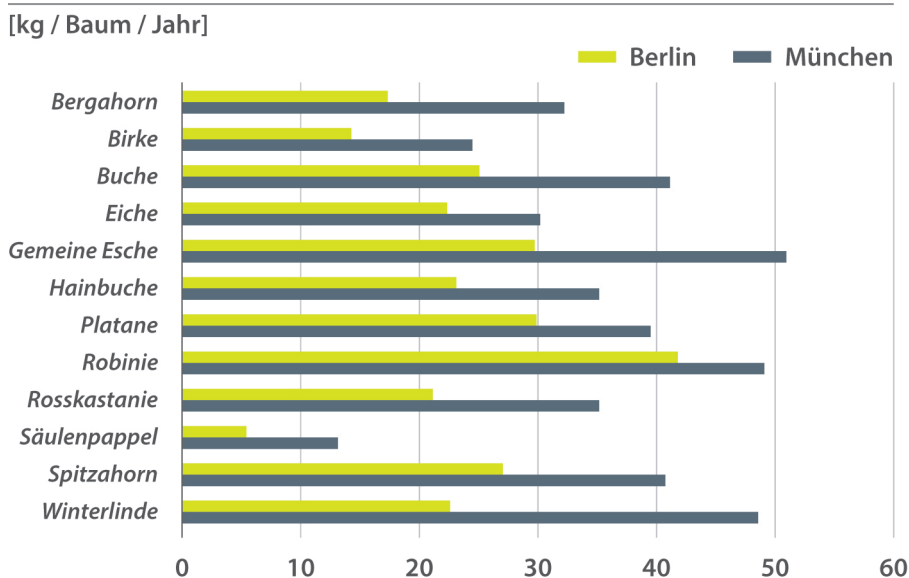


Abbildung 19

Biomassezuwachs für alle Arten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten Berlin und München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

Hinsichtlich der CO₂-Fixierung zeigt ein Vergleich der Städte Berlin und München über alle Arten hinweg höhere Raten in München (Abbildung 20). Je nach Art wurden bis zu doppelt so hohe CO₂-Fixierungsraten simuliert, beispielsweise für die Winterlinde (89,1 kg CO₂ in München gegenüber 41,1 kg CO₂ in Berlin) und die Säulenpappel (24,2 kg CO₂ in München gegenüber 10,1 kg CO₂ in Berlin).

Geringere Unterschiede zeigen die Robinie (90,3 kg CO₂ in München gegenüber 76,6 kg CO₂ in Berlin) und die Platane (72,7 kg CO₂ in München gegenüber 54,9 kg CO₂ in Berlin). Die höchsten CO₂-Fixierungsraten pro Baum und Jahr für die Stammdurchmesserklasse 50 - 60 cm wurden in München für die Gemeine Esche (93,5 kg CO₂) und in Berlin für die Robinie (76,6 kg CO₂) errechnet. Im Durchschnitt

CO₂-Fixierung

[kg CO₂ / Baum / Jahr]

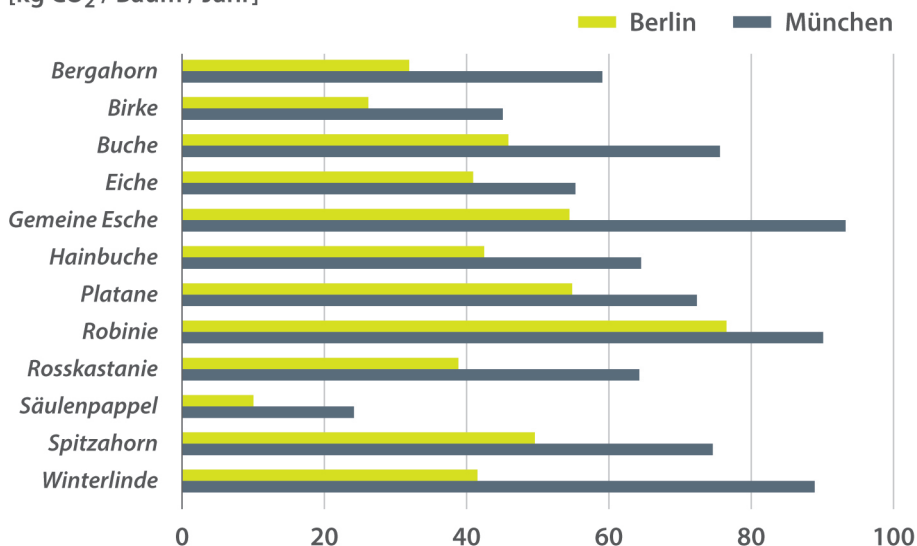


Abbildung 20

CO₂-Fixierung für alle Arten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten Berlin und München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont einschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

liegen die CO₂-Fixierungsraten für die ausgewählte Durchmesserklasse bei 42,8 kg in Berlin und bei 67,4 kg in München.

Aufgrund der höheren Niederschlagsmenge ist in München auch der Abfluss unter den Bäumen erheblich höher als in Berlin (im Durchschnitt aller Bäume 21,9 m³ in Berlin gegenüber 38,6 m³ in München).

Jedoch schwanken die Abflussraten unter den Bäumen je nach Baumart (Abbildung 21). So zeigen die Platane (Berlin 33,3 m³ und München 61,0 m³) und die Eiche (Berlin 26,4 m³ und München 48,7 m³) in beiden Städten die höchsten Abflusswerte, während für die Säulenpappel die niedrigsten Abflusswerte (Berlin 5,9 m³ und München 10,2 m³) simuliert wurden.

Abfluss

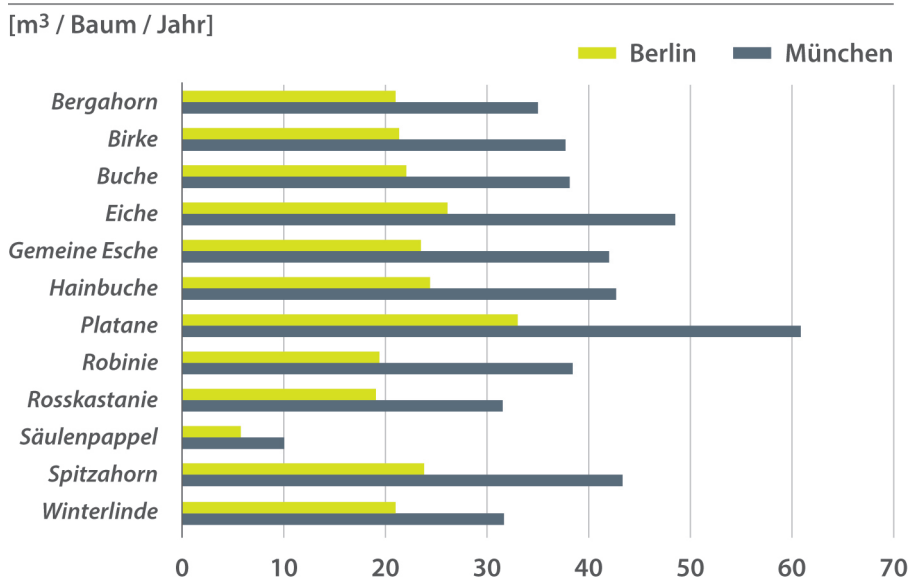


Abbildung 21

Abfluss unterhalb der 12 Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten Berlin und München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

Ähnlich wie für den Biomassezuwachs wurden exemplarisch für die Winterlinde und die Robinie die Zusammenhänge zwischen Kühlleistung im Sommer und Aridität (Trockenheit) der Standorte analysiert (Abbildung 22). Die Analysen zeigen, dass Winterlinden im Sommer eine höhere Kühlleistung

als Robinien besitzen. Mit geringer werdender Aridität eines Standorts (= höherer Trockenheitsindex), nimmt die Kühlleistung der Baumarten deutlich zu. Dabei ist die Steigerung bei der Winterlinde höher als bei der Robinie.

Kühlungsenergie

[Tausend kWh / Baum / Sommer*]

n=34

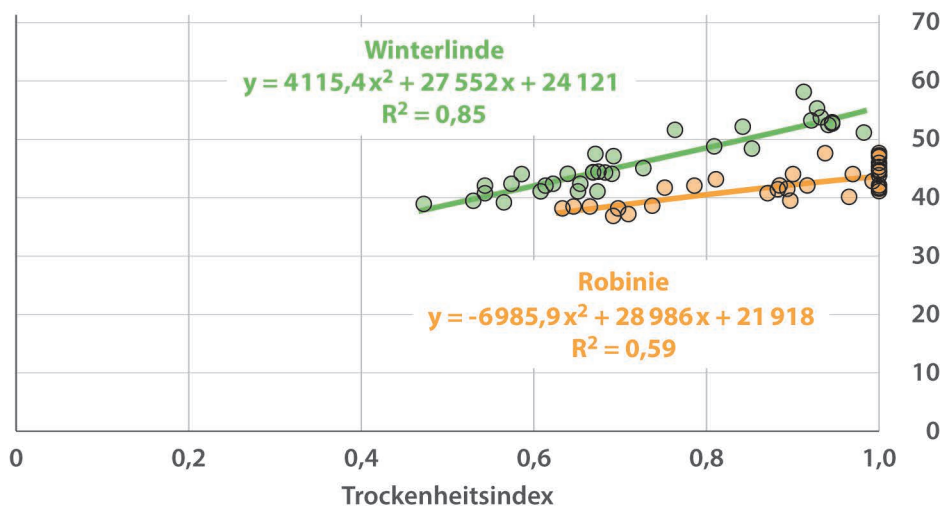


Abbildung 22

Zusammenhang von sommerlicher Kühlungsenergie (Transpiration und Beschattung) und Trockenheitsindex im Mittel über alle Städte für Winterlinden und Robinien (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

* Sommer: Juni - August

Für eine detaillierte Analyse der sommerlichen Kühlleistungen der Baumarten wurden die Städte München und Berlin ausgewählt (Abbildung 23). Höchste Werte wurden für die Platane (Berlin 49.861 kWh und München 67.202 kWh) und die Gemeine Esche (Berlin 46.652 kWh und München 66.046 kWh) simuliert,

während die geringsten Werte für die Säulenpappel gefunden wurden (Berlin 11.197 kWh und München 16.512 kWh). In München ist die Kühlleistung mit durchschnittlich 52.688 kWh allgemein auf einem höheren Niveau als in Berlin mit durchschnittlich 37.715 kWh Kühlleistung.

Kühlungsenergie

[Tausend kWh / Baum / Sommer*]

■ Transpiration ■ Beschattung

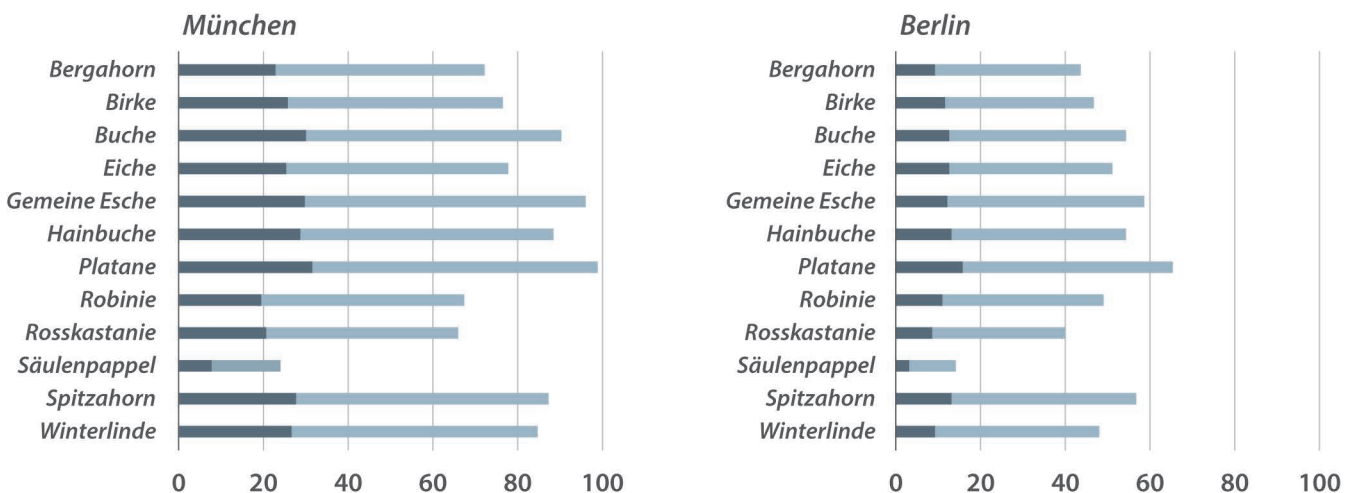


Abbildung 23

Kühlleistung durch Transpiration und Beschattung im Sommer für 12 Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten München (links) und Berlin (rechts) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont einschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

* Sommer: Juni - August

5.

Simulationen zum Einfluss kleinräumiger Standortbedingungen

Einfluss des Bodenwasserspeichers

Die Speicherkapazität des Bodens hat einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt eines Baumes, der wiederum eng mit seinem Wachstum verknüpft ist. Abbildung 24 zeigt über den Zeitraum 1991-2020 eine deutliche Abhängigkeit des mittleren Biomassezuwachses sowohl von der Baumart als auch vom Klima einer Stadt.

Biomassezuwachs

[kg / Baum / Jahr]

— Birke — Gemeine Esche — Robinie — Winterlinde
— Eiche — Platane — Spitzahorn

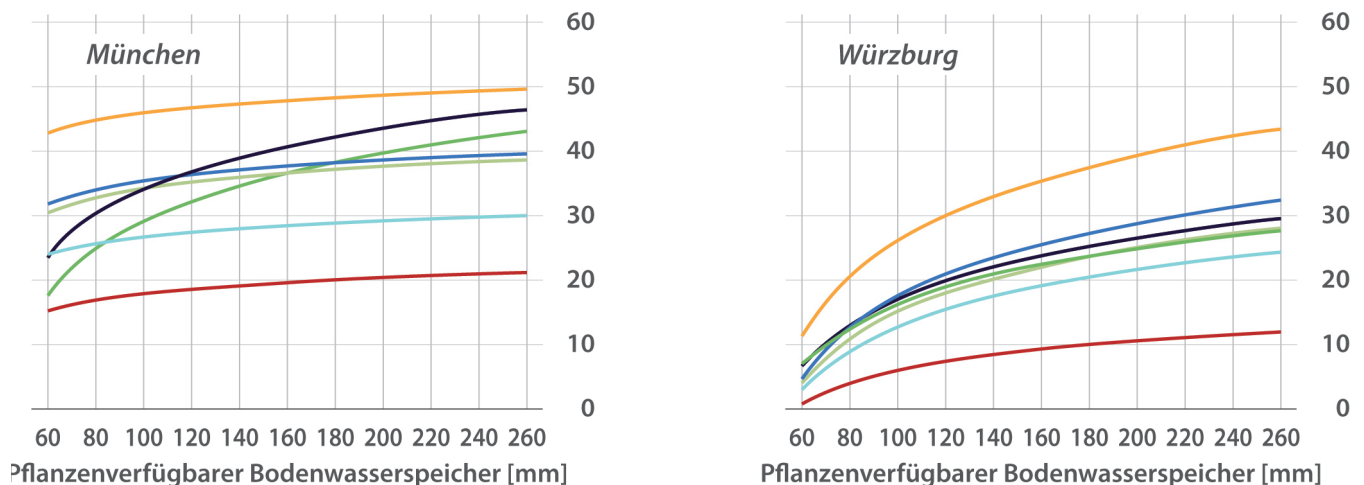


Abbildung 24

Einfluss des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers (nutzbare Feldkapazität) auf den Biomassezuwachs von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Würzburg (rechts), berechnet bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020



” Für die Entwicklung des Modells City Tree wurden mehr als 5.000 Individuen von 12 häufig vorkommenden Stadtbaumarten des temperierten Klimas vermessen

Im regenreichen München zeigen vor allem die Baumarten Winterlinde und Gemeine Esche einen steilen Anstieg des Zuwachses bei zunehmendem pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher. Baumarten wie Platane, Robinie oder Eiche weisen dagegen in München nur geringe Anstiege des Biomassezuwachses bei erhöhtem Bodenwasserspeicher auf. Anders ist die Situation im niederschlagsarmen Würzburg: Hier steigt bei allen Baumarten der Biomassezuwachs bei zunehmendem Bodenwasserspeicher deutlich an. Während z. B. der Biomassezuwachs einer Platane in Würzburg bei einem pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher von 80 mm bei 12 kg pro Jahr liegt, steigt er bei einem Bodenwasserspeicher von 200 mm auf 31 kg pro Jahr an; in München liegen die jährlichen Zuwächse derselben Baumart bei 35 kg (80 mm Bodenspeicher) und 39 kg (200 mm Bodenspeicher).

Der Einfluss des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers auf den Wasserhaushalt der einzelnen Baumarten wird in Abbildung 25 anhand der Werte für die Städte München und Würzburg verglichen. Die Unterschiede bei den mittleren Transpirationssummen über den Zeitraum 1991-2020 zwischen den einzelnen Baumarten sind in Würzburg deutlich geringer als in München, was an den Niederschlagsverhältnissen liegt.

Folglich fallen auch die absoluten mittleren Jahressummen der Transpiration und des Abflusses in München deutlich höher aus als in Würzburg. Der Anstieg der Transpirationsraten bei zunehmendem pflanzenverfügbarem Bodenwasserspeicher ist in Würzburg steiler als in München.

Transpiration und Abfluss

[mm / Baum / Jahr]

— Birke — Gemeine Esche — Robinie — Winterlinde
— Eiche — Platane — Spitzahorn

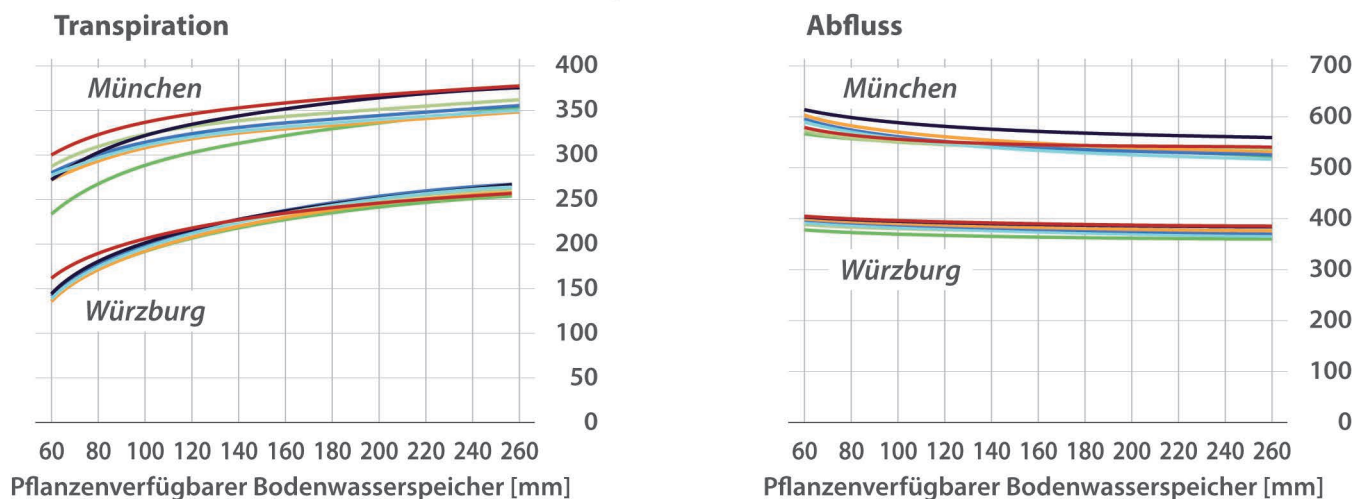


Abbildung 25

Einfluss des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers (nutzbare Feldkapazität) auf die Transpiration (links) und den Abfluss unter dem Baum (rechts) für sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Würzburg berechnet bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020

Der pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher beeinflusst auch die sommerliche Kühlung durch Transpiration (Abbildung 26). In München sind die Anstiege bei zunehmendem Bodenwasserspeicher mit Ausnahme der Baumarten Winterlinde und Gemeine Esche deutlich geringer als in Würzburg.

Die absolute Kühlung durch Verdunstung in den Sommermonaten ist in München bei einem pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher von über 200 mm bei der Platane am höchsten. Die Werte liegen gemittelt über die Jahre 1991-2020 bei nahezu 25.000 kWh. In Würzburg zeigt dieselbe Baumart bei einem pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeicher von über 240 mm die höchsten Kühlungsraten, die Werte sind mit 17.400 kWh aber deutlich niedriger als in München.

Kühlungsenergie

[Tausend kWh / Baum / Sommer*]

— Birke — Gemeine Esche — Robinie — Winterlinde
— Eiche — Platane — Spitzahorn

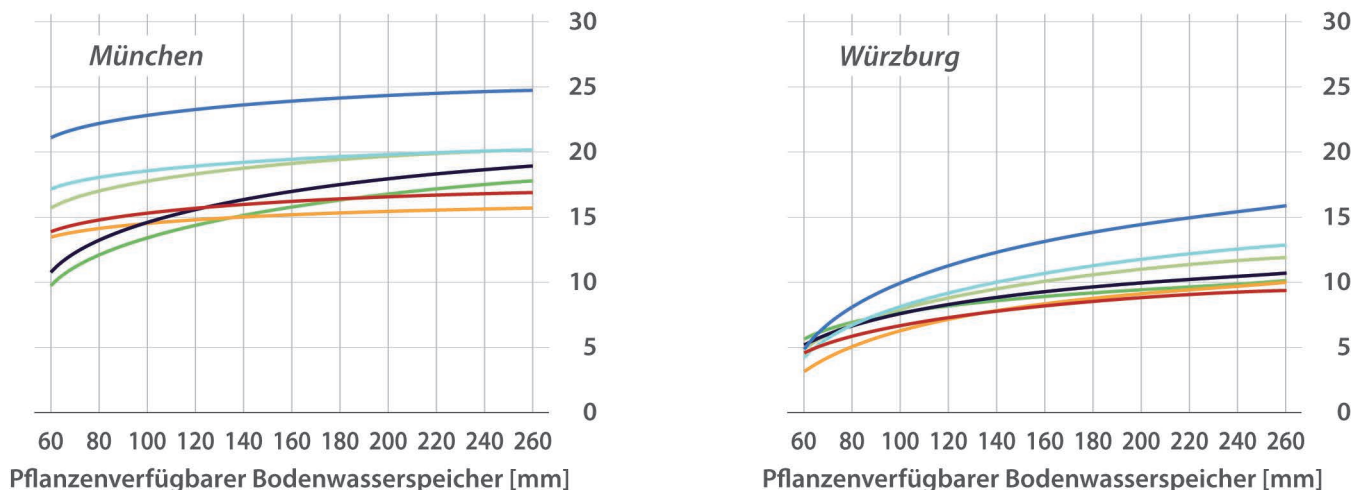


Abbildung 26

Einfluss des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers (nutzbare Feldkapazität) auf die Kühlung durch Transpiration im Sommer von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Würzburg (rechts), berechnet bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020

* Sommer: Juni - August

Einfluss der Bodenversiegelung

Neben dem Bodenwasserspeicher spielt vor allem die Bodenversiegelung eine zentrale Rolle für den Wasserhaushalt und das Wachstum von Bäumen. Dieser Einfluss ist in Abbildung 27 quantifiziert.

Biomassezuwachs

[kg / Baum / Jahr]

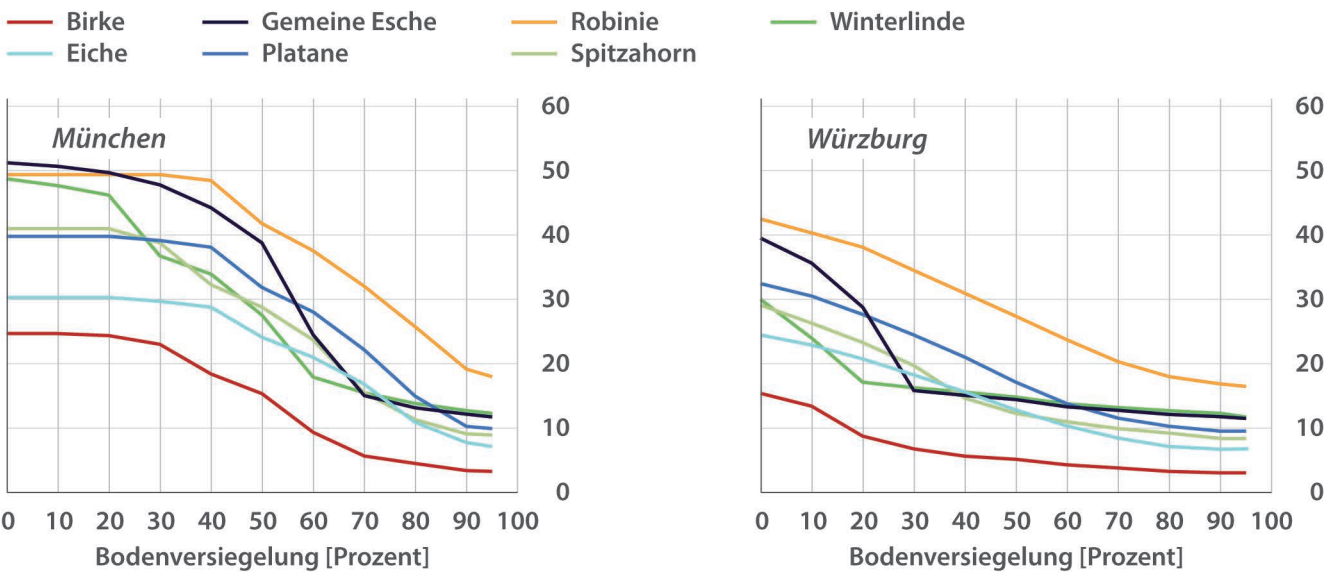


Abbildung 27

Einfluss der Bodenversiegelung auf den Biomassezuwachs von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Würzburg (rechts) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020

Wenn die Bodenversiegelung sich erhöht, zeigen alle Baumarten sowohl im niederschlagsreichen München als auch im niederschlagsarmen Würzburg erhebliche Rückgänge beim Wachstum. Bei sehr hohen Versiegelungsgraden spielt das Klima einer Stadt nur noch eine untergeordnete Rolle. So beträgt die Biomassezunahme der Robinie bei einer Bodenversiegelung von 95 % in München 16,9 kg pro Jahr, die der Birke nur 3,2 kg pro Jahr. In Würzburg liegen die Werte beider Baumarten bei gleicher Bodenversiegelung bei 16,9 bzw. 3,0 kg pro Jahr. Wenn der Boden unversiegelt ist, beträgt der Zuwachs bei der Robinie in München 49,3 kg pro Jahr und in Würzburg 40,6 kg pro Jahr.

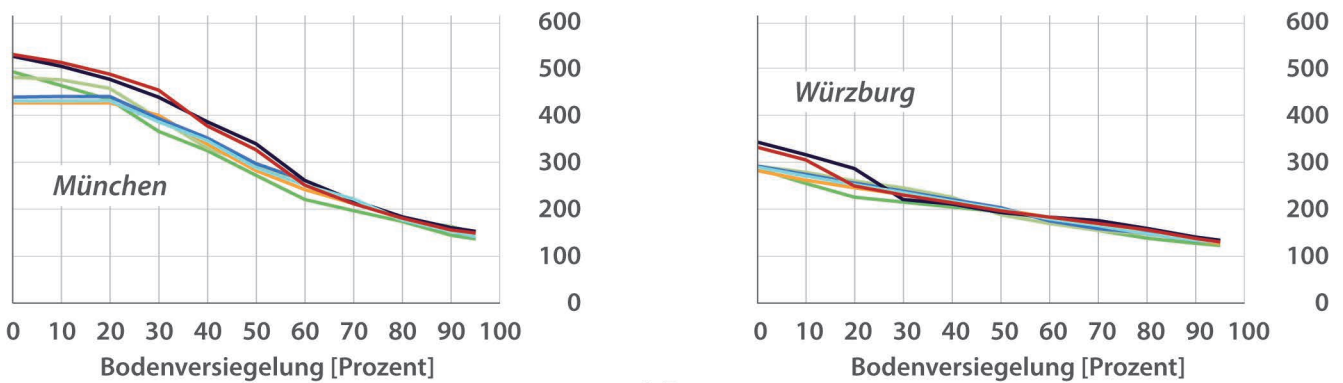
Hauptinflussfaktor für das Wachstum ist dabei der Wasserhaushalt des einzelnen Baumes. Abbildung 28 zeigt, wie dieser bei den einzelnen Baumarten im langjährigen Mittel von der Bodenversiegelung abhängt.

Transpiration und Abfluss

[mm / Baum / Jahr]

— Birke — Gemeine Esche — Robinie — Winterlinde
— Eiche — Platane — Spitzahorn

Transpiration



Abfluss

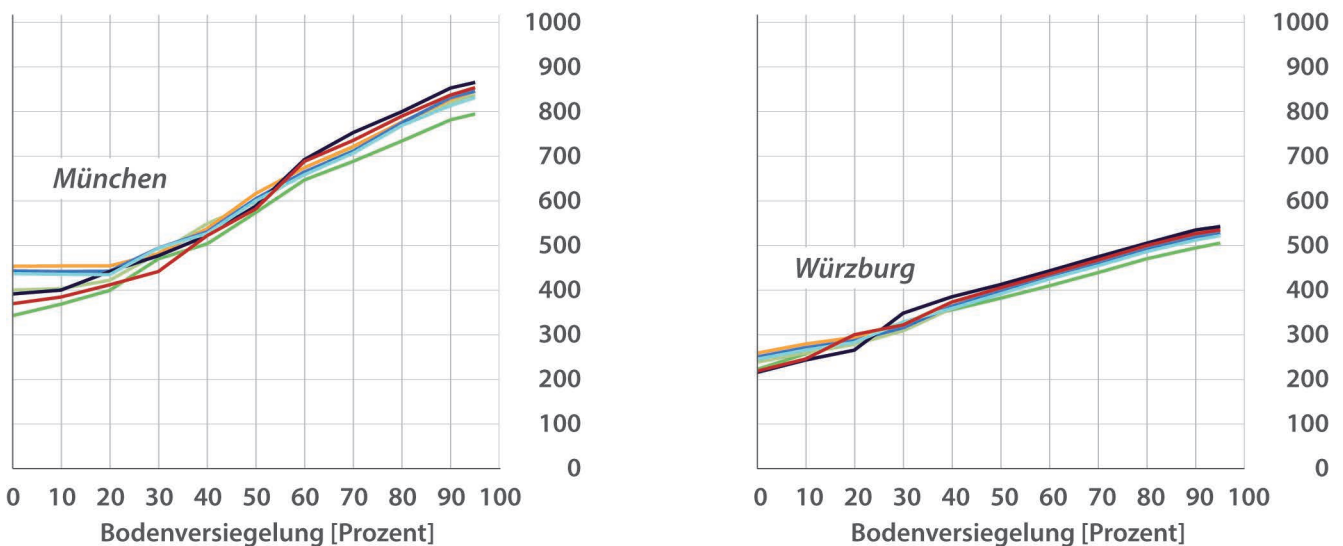


Abbildung 28

Einfluss der Bodenversiegelung auf die Transpiration (oben) und den Abfluss unter dem Baum (unten) von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Würzburg (rechts) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020



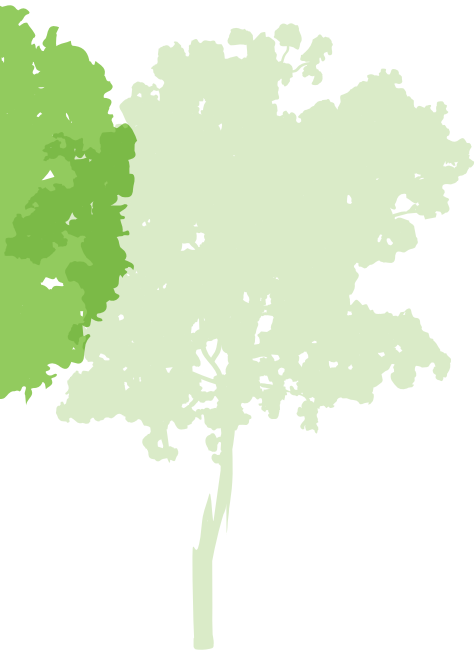
Nimmt die Bodenversiegelung zu, verringert sich die Transpiration der einzelnen Baumarten signifikant. Während in München vor allem bei geringen Bodenversiegelungsgraden (unter 60 %) Unterschiede zwischen den Baumarten bei der mittleren Jahressumme der Transpiration bestehen, sind bei höheren Bodenversiegelungen keine Artunterschiede mehr erkennbar. Gleiches gilt für Würzburg, jedoch sind hier die Unterschiede bereits ab einer Bodenversiegelung von 30 % sehr gering.

Aufgrund der hohen Niederschläge fallen die mittleren Abflusssummen unter den Bäumen in München deutlich höher aus als in Würzburg. In München lassen sich zudem größere Unterschiede zwischen den Baumarten verzeichnen als in Würzburg. So liegt beispielsweise das langjährige Mittel des Abflusses unter der Winterlinde auf unversiegelten Böden bei 337 mm pro Jahr, das der Platane bei 433 mm und das der Robinie bei 445 mm. Diese Werte steigen mit zunehmender Bodenversiegelung markant bis auf 850 mm an (Gemeine Esche bei 95 % Bodenversiegelung). In Würzburg liegen bei Bodenversiegelungsgraden von 95 % die Maximalwerte des Abflusses bei

480 bis 520 mm, während bei unversiegelten Böden lediglich zwischen 210 mm und 250 mm im Mittel pro Jahr abfließen.

Große Unterschiede zwischen den Baumarten lassen sich auch bei den Ökosystemleistungen wie z. B. der Kühlung durch Transpiration im Sommer erkennen, auch dies wieder stark abhängig von den Bodenversiegelungsgraden. So liegt in München beispielsweise die mittlere sommerliche Kühlung durch Transpiration (1991-2020) bei geringen Versiegelungsgraden (kleiner als 20 %) bei der Platane bei 32.000 kWh und bei der Robinie bei 20.000 kWh.

Robinie und Birke zeigen in München nur geringe Kühlleistungen, vor allem bei hohen Versiegelungsgraden (weniger als 7.500 kWh). In Würzburg sind die Werte wiederum niedriger, konkret unter 6.000 kWh, während die höchsten Kühlleistungen auch in diesem Fall von der Platane erreicht werden (17.000 kWh).



Kühlungsenergie

[Tausend kWh / Baum / Sommer*]

— Birke — Gemeine Esche — Robinie — Winterlinde
 — Eiche — Platane — Spitzahorn

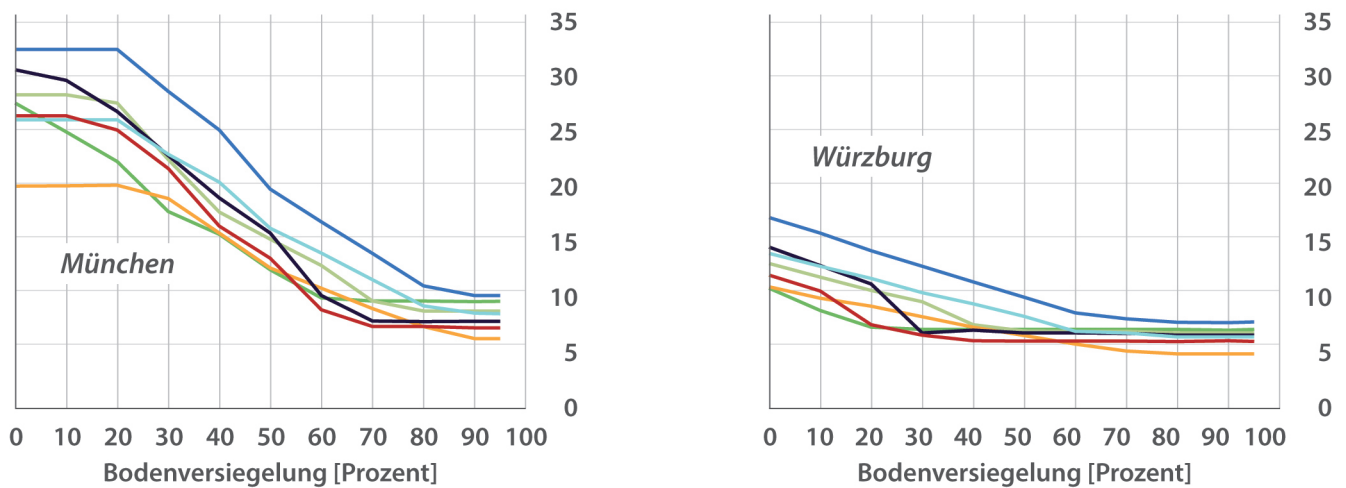


Abbildung 29

Einfluss der Bodenversiegelung auf die Kühlung durch Transpiration im Sommer bei sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Würzburg (rechts) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont einschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020

* Sommer: Juni - August

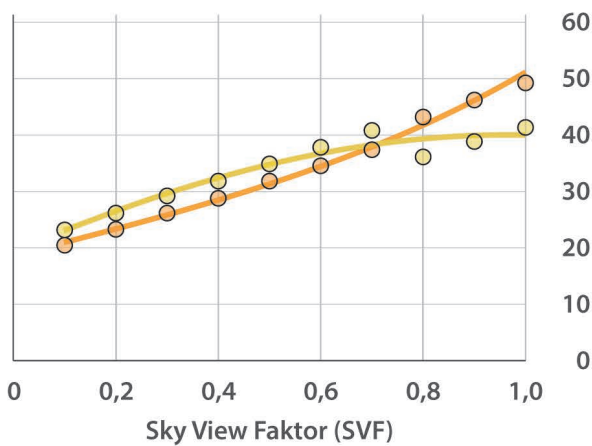
Einfluss der Horizontabdeckung

Die Horizontabdeckung beeinflusst vornehmlich die Strahlung, die maßgeblich für die Photosynthese ist. Somit wird vor allem der Zuwachs eines Baumes von der Horizontabdeckung gesteuert. Die spezifische Ausnutzung der Strahlung ist stark von der Physiologie der Baumart abhängig. Abbildung 30 zeigt dies beispielhaft für die Lichtbaumart Robinie und die Schattenbaumart Buche.

Biomassezuwachs

[kg / Baum / Jahr]

— Buche — Robinie



Kronenprojektionsfläche

[m² / Baum / Jahr]

— Buche — Robinie

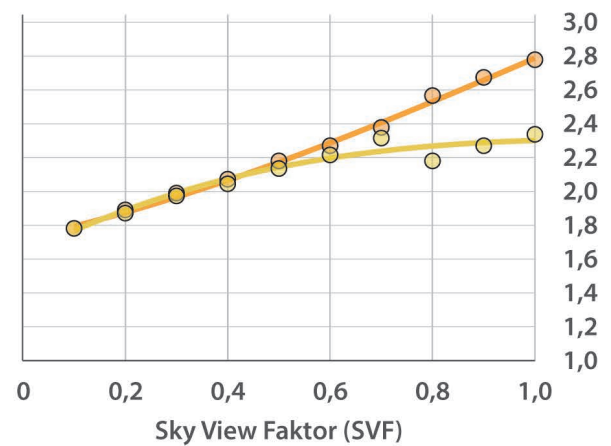


Abbildung 30

Einfluss der Horizontüberhöhung (Sky View Faktor, SVF) auf den Zuwachs der Biomasse (links) und der Kronenprojektionsfläche (rechts) von Robinie und Buche (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 0 % im Mittel der Jahre 1991-2020

Bei eingeschränkten Lichtverhältnissen, d. h. bei einer hohen Horizontabdeckung (= geringer Sky View Faktor, SVF), zeigt die schattentolerante Baumart Buche einen gegenüber der Robinie höheren Zuwachs an Biomasse und eine etwas höhere Zunahme der Kronenprojektionsfläche. Mit besser werdenden Lichtverhältnissen, d. h. ab einem SVF von 0,7, hat die Robinie höhere Zuwächse sowohl an Biomasse als auch an Kronenprojektionsfläche als die Buche.

Auch der Wasserhaushalt wird vom Strahlungsregime beeinflusst (Abbildung 31). Mit steigendem SVF nimmt die mittlere Jahressumme der Transpiration stetig zu.

Liegt sie bei einem SVF von 0,2 bei 520 mm (Buche), steigt sie bis auf 600 mm bei einem SVF von 1,0 an. Ein solcher Anstieg der mittleren jährlichen Transpirationssummen bei zunehmendem SVF ist bei allen anderen Baumarten ähnlich wie bei der Buche zu beobachten. Auch beim mittleren Jahresabfluss in Abhängigkeit vom SVF verhalten sich die Baumarten analog, wobei hier die Abflusssummen mit steigendem SVF abnehmen.

Transpiration und Abfluss

[mm / Baum / Jahr]

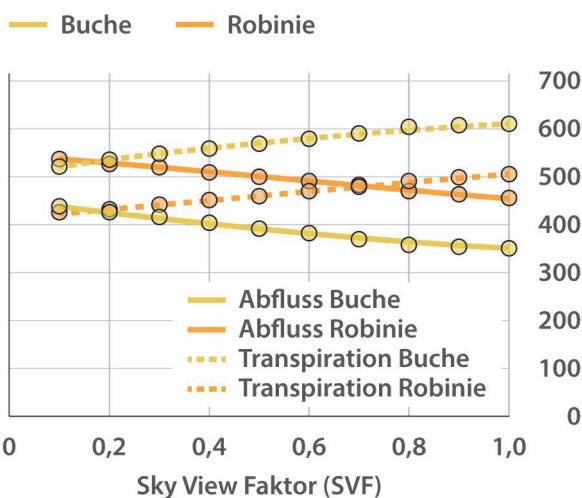


Abbildung 31

Einfluss der Horizontüberhöhung (Sky View Faktor, SVF) auf die Transpiration und den Abfluss von Robinie und Buche (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 0 % im Mittel der Jahre 1991-2020

Kühlung durch Transpiration

[Tausend kWh / Baum / Sommer*]

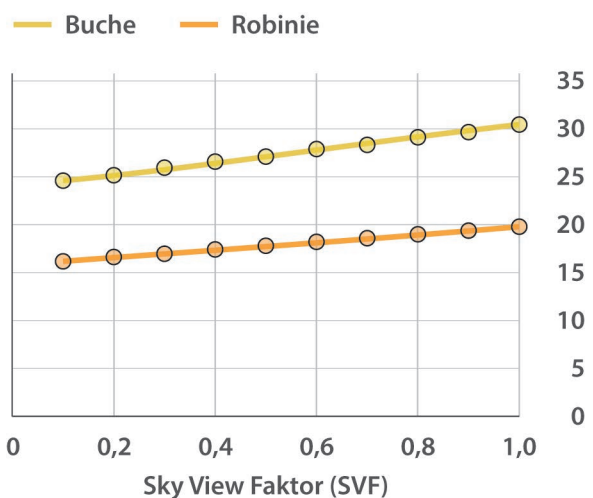


Abbildung 32

Einfluss der Horizontüberhöhung (Sky View Faktor, SVF) auf die Kühlung durch Transpiration im Sommer von Robinie und Buche (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 0 % im Mittel der Jahre 1991-2020

* Sommer: Juni - August

Indem die Einstrahlung den Wasserhaushalt eines Baumes beeinflusst, modifiziert die Horizontabdeckung auch die Kühlung durch Transpiration (Abbildung 32).

Abbildung 32 zeigt einen stetigen Anstieg der Kühlungsenergie durch Transpiration im Sommer mit zunehmendem SVF. So weist eine Buche in München bei einem SVF von 0,2 eine Kühlungsenergie von 24.750 kWh auf, bei einem SVF von 1,0 liegt der Wert bei 30.375 kWh. Zwischen den Baumarten bestehen deutliche Unterschiede. Die Werte für die Robine sind mit 16.250 kWh (SVF=0,2) bzw. 19.850 kWh (SVF=1,0) deutlich niedriger.

6.

Simulationen zum Einfluss von Klimaveränderungen

Zusammen mit dem sich verstärkenden Wärmeinseleffekt der Städte wird sich auch der globale Klimawandel auf das Wachstum und die damit verbundenen Ökosystemleistungen von Stadtbäumen auswirken. Anhand der zwei Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 wird im Folgenden beispielhaft aufgezeigt, wie und in welchem Maße die Klimaveränderungen der fernen Zukunft (2081-2090) das Baumwachstum und seine Leistungen beeinflussen. Für die Simulationen wurden zwei Städte mit deutlich unterschiedlichen klimatischen Bedingungen (München und Berlin) ausgewählt. Die Simulationen

erfolgten für die Baumarten Winterlinde und Robinie, da sie unterschiedliche Trockentoleranzen aufweisen. Zusätzlich zu den zwei Klimaszenarien wurden die Simulationen auch für das extreme Trockenjahr 2003 durchgeführt.

Die Simulationen zeigen, dass das künftige Klima in München die CO₂-Fixierung vor allem im Szenario RCP 8.5 verringert, insbesondere bei der Winterlinde (Abbildung 33). Für Berlin ergaben alle Szenarien deutlich niedrigere Werte als für München. So liegt die CO₂-Fixierung bei der Winterlinde

CO₂-Fixierung

[kg CO₂ / Baum / Jahr]

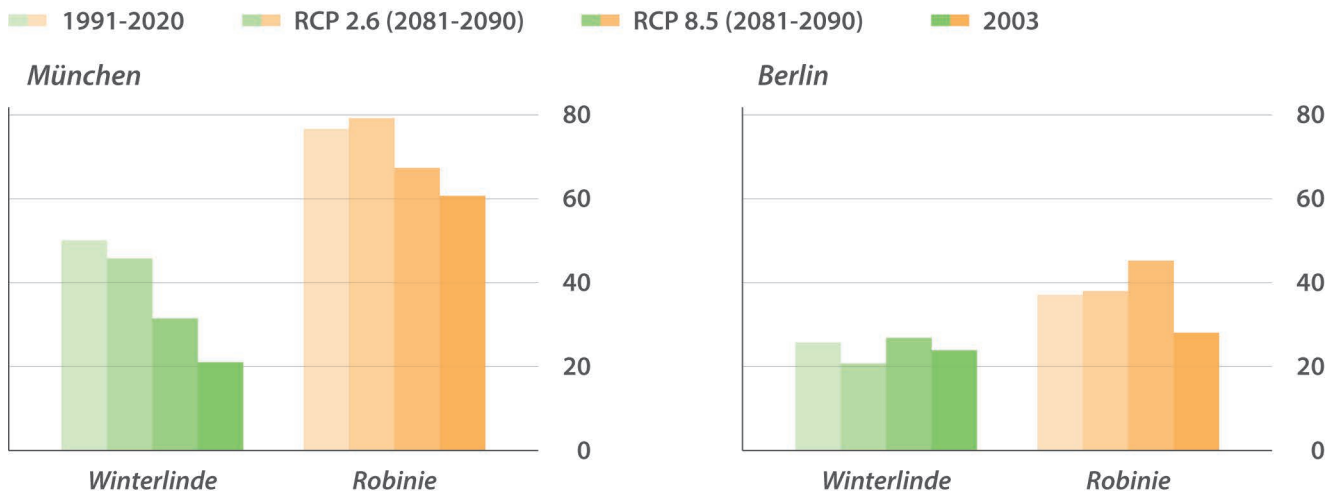


Abbildung 33

Einfluss von Klimaveränderungen auf die CO₂-Fixierung von Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Berlin (rechts) für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung

in München bei 50,3 kg CO₂ pro Jahr, in Berlin bei nur 26 kg CO₂ pro Jahr.

Auffällig ist die Erhöhung der jährlichen CO₂-Fixierung bei der Robinie in Berlin im Szenario RCP 8.5. Sie steigt von 37,3 kg CO₂ pro Jahr (langjähriges Mittel 1991-2020) auf 47,8 kg CO₂ an.

Im Trockenjahr 2003 beträgt die CO₂-Fixierung mit 21,1 kg CO₂ pro Jahr bei der Winterlinde in München weniger als die Hälfte des langjährigen Mittels (50,3 kg CO₂ pro Jahr). Bei der Robinie ist der

Rückgang der jährlichen CO₂-Fixierung in München weniger hoch: 76,3 kg CO₂ pro Jahr (langjähriges Mittel) gegenüber 60,7 kg CO₂ pro Jahr (2003). In Berlin fallen die Rückgänge deutlich geringer aus, wobei der größere Rückgang bei den Robinien zu verzeichnen ist: 37,6 kg CO₂ pro Jahr (langjähriges Mittel) gegenüber 28,4 kg CO₂ pro Jahr (2003).

Der Klimawandel wirkt sich in den beiden untersuchten Städten Berlin und München unterschiedlich auf die transpirationskühlende Wirkung von Winterlinde und Robinie aus (Abbildung 34).

Kühlung durch Transpiration

[Tausend kWh / Baum / Sommer*]

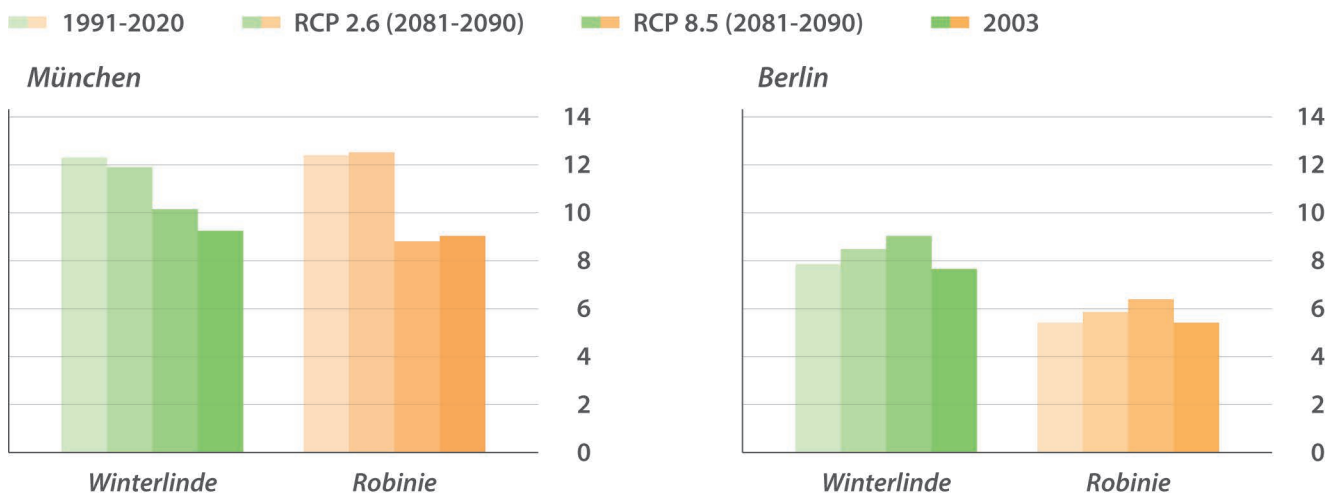


Abbildung 34

Einfluss der Klimaveränderungen auf die Kühlwirkung durch Transpiration im Sommer von Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Berlin (rechts) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung

* Sommer: Juni - August

In München nimmt die simulierte sommerliche Transpirationskühlung im Mittel der beiden Baumarten, ausgehend vom langjährigen Mittelwert für 1991-2020, in den Szenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 bis zum Trockenjahr 2003 stufenweise ab: von 12.431 kWh (1991-2020) auf 9.182 kWh (2003).

Demgegenüber sind in Berlin Erhöhungen bei der sommerlichen Kühlung durch Transpiration in den zwei Klimaszenarien zu verzeichnen: konkret Steigerungen von 8 % (RCP 2.6) und 13% (RCP 8.5) für die

Winterlinde und von 7 % (RCP 2.6) und 16 % (RCP 8.5) für die Robinie. Dies könnte ein Effekt der erhöhten CO₂-Konzentration in der Atmosphäre sein, aber auch am veränderten Niederschlag im Jahresverlauf liegen.

Den Einfluss des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Bäume illustrieren die Abbildungen 35 und 36. Interessant ist, dass der Wasserverbrauch der beiden Baumarten in den zwei Städten leicht zunimmt. Dagegen ist der Wasserverbrauch der Bäume im Trockenjahr 2003 in beiden Städten deutlich niedriger.

Wasserverbrauch

[m³ / Baum / Jahr]

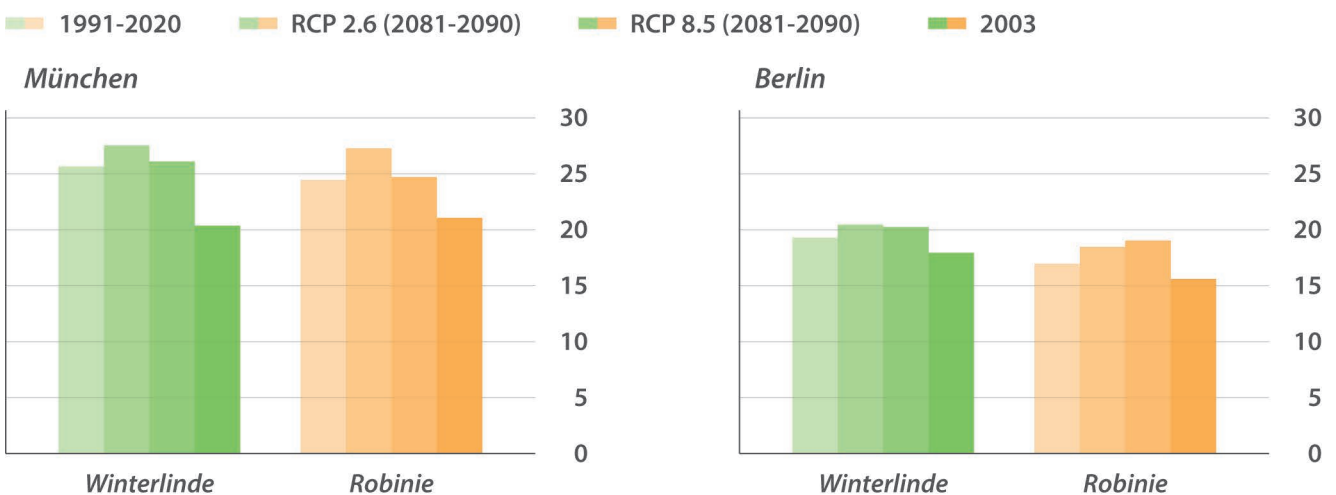


Abbildung 35

Einfluss von Klimaveränderungen auf den Wasserverbrauch von Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Berlin (rechts) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung

Insbesondere in München geht der Wasserverbrauch der Bäume markant zurück. So reduziert sich der Wasserverbrauch der Winterlinde von 25,7 m³ pro Jahr (langjähriges Mittel 1991-2020) auf 20,3 m³ pro Jahr (2003), der der Robinie von 24,4 m³ auf 21,2 m³ pro Jahr.

Beim jährlichen Abfluss bewirken die Veränderungen der Klimabedingungen gegenüber dem langjährigen Mittel nur geringe Ab- bzw. Zunahmen. So liegt beispielsweise in München der Abfluss unter einer Robinie im Durchschnitt der Jahre 1991-2020 bei

52 m³ pro Jahr, der einer Winterlinde bei 54 m³. In den Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 erhöhen sich die Abflussraten sowohl in München als auch in Berlin um weniger auf 3 m³ pro Jahr. Im Trockenjahr 2003, in dem deutlich weniger Niederschlag gefallen ist (Abbildung 36), sind dagegen starke Rückgänge des Abflusses unter den Bäumen erkennbar. In München verringern sich die Abflussraten unter der Winterlinde um 14 m³ pro Jahr und unter der Robinie um 18 m³. In Berlin beträgt der Rückgang 9 m³ pro Jahr bei der Winterlinde und 7 m³ bei der Robinie.

Abfluss

[m³ / Baum / Jahr]

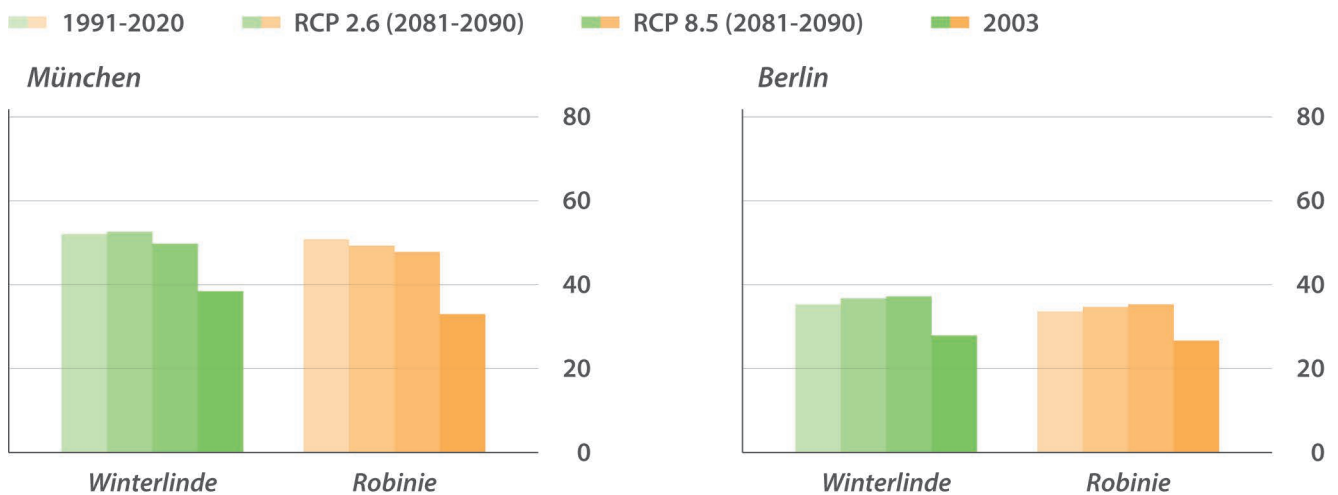


Abbildung 36

Einfluss von Klimaveränderungen auf den Abfluss unter den Baumarten Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München (links) und Berlin (rechts) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizont einschränkung

Die in diesem Leitfaden vorgestellten Ergebnisse sind nur einige wenige Beispiele für die zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten von Städten, Baumarten, Baumdimensionen und Standortbedingungen, für die mit dem interaktiven Leitfaden Simulationen durchgeführt werden können. Aber bereits diese wenigen Beispiele führen vor Augen, in welchem Ausmaß das Wachstum und die Ökosystemleistungen der verschiedenen Baumarten in unseren Städten von den jeweiligen Standortbedingungen abhängen sowie von den mikro- und makroklimatischen Veränderungen ihres Umfelds.

Literatur

Zitierte Literatur

- Baek, H.-J., Lee, Johan, Lee, H.-S., Hyun, Y.-K., Cho, C., Kwon, W.-T., Marzin, C., Gan, S.-Y., Kim, M.-J., Choi, D.-H., Lee, Jonghwa, Lee, Jaeho, Boo, K.-O., Kang, H.-S., Byun, Y.-H., 2013. Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.* 49, 603–618. doi: 10.1007/s13143-013-0053-7.
- BlueGreenStreets (2020): BlueGreenStreets als multicodierte Strategie zur Klimafolgenanpassung – Wissenstand 2020, Hamburg. Statusbericht im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“.
- Dervishi, V.; Poschenrieder, W.; Rötzer, T.; Moser-Reischl, A.; Pretzsch, H., 2022: Effects of Climate and Drought on Stem Diameter Growth of Urban Tree Species. *Forests* 13, 641. doi: 10.3390/f13050641.
- DWA, 2018. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA). Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft. 238:1-35. s.142.
- Ferrini, F., Konijnendijk van den Bosch, C. C., Fini, A. (2017): Routledge Handbook of Urban Forestry. Routledge, London.
- Franceschi, E., Moser-Reischl, A., Rahman, M. A., Pauleit, S., Pretzsch, H., Rötzer, T. (2022): Crown Shapes of Urban Trees-Their Dependences on Tree Species, Tree Age and Local Environment, and Effects on Ecosystem Services. *Forests* 13: 748, doi: 10.3390/f13050748.
- GALK e. V. (2018): GALK Straßenbaumliste. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz.
- Haxeltine, A.; Prentice, I.C., 1996: A general model for the light use efficiency of primary production by terrestrial ecosystems. *Funct. Ecol.* 10, 551-561.
- IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Johns, T.C., Durman, C.F., Banks, H.T., Roberts, M.J., McLaren, A.J., Ridley, J.K., Senior, C.A., Williams, K.D., Jones, A., Rickard, G.J., Cusack, S., Ingram, W.J., Crucifix, M., Sexton, D.M.H., Joshi, M.M., Dong, B.-W., Spencer, H., Hill, R.S.R., Gregory, J.M., Keen, A.B., Pardaens, A.K., Lowe, J.A., Bodas-Salcedo, A., Stark, S., Searl, Y., 2006. The New Hadley Centre Climate Model (HadGEM1): Evaluation of Coupled Simulations. *J. Clim.* 19, 1327–1353. doi: .org/10.1175/JCLI3712.1.
- Kuttler, W. (2004): Stadtklima. Teil 1: Grundzüge und Ursachen. Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung. *Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 16, 187–199.
- Leichtle, T., Garcia de León, A.S., Rötzer, T., Martin, K., Pauleit, S., Taubenböck, H. (2024, in print) Fernerkundung ermöglicht die flächendeckende Abschätzung der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen. *AFZ – der Wald* 8/2024.
- Limmer, T. (2018): Stadtbäume in Würzburg: Wie die Öffentlichkeit durch Informationsvisualisierungen sensibilisiert werden kann. HAW München, TU München, München.

- McHale, M. R., Burke, I. C., Lefsky, M. A., Peper, P. J., McPherson, E. G. (2009): Urban forest biomass estimates: is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? *Urban Ecosystems* 12:95–113, doi: 10.1007/s11252-009-0081-3.
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment (2005): Millennium Ecosystem Assessment. Living beyond Our Means: Natural Assets and Human Well-Being, Washington D.C.
- Meyer, F. H. (1978): *Bäume in der Stadt*. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Mitchell, A. (1979): *Die Wald- und Parkbäume Europas*. 2. Auflage. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., Pretzsch, H. (2015): Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening* 14, 1110–1121. doi: 10.1016/j.ufug.2015.10.005.
- Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., Pretzsch, H. (2018): Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 188 (5/6): 94-111. doi: 10.23765/afjz0002006.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakiceno-vic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J., 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. doi: 10.1038/nature08823.
- Niinemets, Ü., Valladares, F. (2006): Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological monographs*, 76(4), 521-547, doi: 10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2.
- Oke, T. (1982): The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, 1–24, doi: 10.1002/qj.49710845502.
- Parsa, A. V., Salehi, E., Yavari, A. R., van Bodegom, P. M. (2019): Evaluating the potential contribution of urban ecosystem service to climate change mitigation. *Urban Ecosystems* 22, 989–1006, doi: 10.1007/s11252-019-00870-w.
- Pauleit, S., Duhme, F. (1999): Stadtstrukturtypen. Bestimmung der Umweltleistungen von Stadtstrukturtypen für die Stadtplanung. *Raumplanung* 84, 33–44.
- Peper, P. J., Alzate, C. P., McNeil, J. W., Hashemi, J. (2014): Allometric equations for urban ash trees (*Fraxinus* spp.) in Oakville, Southern Ontario, Canada. *Urban Forestry & Urban Greening* 13, 175-183. doi: 10.1016/j.ufug.2013.07.002.
- PIK, 2017. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK). ISIMIP2a Simulation Protocol. URL: <https://isimip.org/protocol/#isimip2a>. (Zugriff am: 2.7.22).
- Rahman, M. A., Hartmann, C., Moser-Reischl, A., von Strachwitz, M. F., Paeth, H., Pretzsch, H. (2020): Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 287: 107947, doi: 10.1016/j.agrformet.2020.107947.
- Raum S., Collins C.M., Urquhart J., Potter C., Pauleit S., Egerer M. (2023): Tree insect pests and pathogens: a global systematic review of their impacts in urban areas. *Urban Ecosystems* 26 (2), 587-604, doi: 10.1007/s11252-022-01317-5.

- Roloff, A. (2013): Bäume in der Stadt. Ulmer, Stuttgart.
- Rötzer, T., Dittmar, C., Elling, W., 2004. A model for site specific estimation of the actual soil water content and the evapotranspiration in forest ecosystems. *Journal of Environmental Hydrology* 12/7: 1-14.
- Rötzer, T., Häberle, K. H., Kallenbach, C., Matyssek, R., Schütze, G., Pretzsch, H. (2017): Tree species and size drive water consumption of beech/spruce forests – a simulation study highlighting growth under water limitation. *Plant and Soil* 418, 337–356, doi: 10.1007/s11104-017-3306-x.
- Rötzer T., Moser-Reischl A., Rahman M.A., Grote R., Pauleit S., Pretzsch H. (2021a): Modelling Urban Tree Growth and Ecosystem Services: Review and Perspectives. In: *Progress in Botany*. Springer, Berlin, Heidelberg; 82: 405 – 464; doi: 10.1007/124_2020_46.
- Rötzer, T., Moser-Reischl, A., Rahman, M.A., Hartmann, C., Paeth, H., Pauleit, S., Pretzsch, H. (2021b): Urban tree growth and ecosystem services under extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 308, doi: 10.1016/j.agrformet.2021.108532.
- Rötzer, T., Rahman, M.A., Moser-Reischl, A., Pauleit, S., Pretzsch, H. (2019): Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of the Total Environment* 676: 651–664, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.235.
- Scherer, D., Antretter, F., Bender, S., Cortekar, J., Emeis, S., Fehrenbach, U., Gross, G., Halbig, G., Hasse, J., Maronga, B., Raasch, S., Scherber, K. (2019): Urban Climate Under Change [UC] 2 – A National Research Programme for Developing a Building-Resolving Atmospheric Model for Entire City Regions. *Meteorologische Zeitschrift* 28, 95–104. doi: 10.1127/metz/2019/0913.
- TEEB DE, Naturkapital Deutschland (2016): Ökosystemleistungen in der Stadt – Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen, in: Kowarik, I., Bartz, R., Brenck, M. (Hgg.). Technische Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Berlin, Leipzig.
- Telewski, F. W., Aloni, R., Sauter, J. J. (1996): Physiology of secondary tissues of *Populus*. In: R. F. Stettler et al.: *Biology of Populus and its implications for management and conservation*.
- Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change* 109, 5–31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- Watt, M. S., Kirschbaum, M.U.F. (2011): Moving beyond simple linear allometric relationships between tree height and diameter. *Ecological Modelling* 222, 3910–3916. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.10.011.
- Weller, M. (2021): Tree inventory data of Central European cities – Studies on the composition and structure of urban tree populations and derivation of ecosystem services. Master thesis TU Munich, School of Life Sciences, 78 pp.
- Wilhelm, L. (2019): Perspektiven mit neuen Baumarten im städtischen Bereich. Präsentation beim Kellerseminar am 14.03.2019, München.

Weiterführende Literatur

- Böll, S. (2018): Stadtbäume der Zukunft. Wichtige Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Stadtgrün 2021“. Veitshöchheimer Berichte 184, S. 75-85.
- Franceschi, E., Moser-Reischl, A., Honold, M., Rahman, M. A., Pretzsch, H., Pauleit, S. (2023): Urban environment, drought events and climate change strongly affect the growth of common urban tree species in a temperate city. *Urban Forestry & Urban Greening* 88: 128083, doi: 10.1016/j.ufug.2023.128083.
- Haase, D., Hellwig, R. (2022): Effects of heat and drought stress on the health status of six urban street tree species in Leipzig, Germany. *Trees, Forests and People* 8, 100252, doi: 10.1016/j.tfp.2022.100252.
- Korkou, M., Tarigan, A. K. M., Hanslin, H. M. (2023): The multifunctionality concept in urban green infrastructure planning: A systematic literature review. *Urban Forestry & Urban Greening* 85, 127975, doi: 10.1016/j.ufug.2023.127975.
- Pauleit, S., Erlwein, S., Linke, S., Rahman, M., Zölch, T., Rötzer T. (2023): Grün-blaue Infrastruktur für die Klimawandelanpassung der Stadt. *Promet* 106, 81-90, doi: 10.5676/DWD_pub/promet_106_08.
- Pauleit, S., Zölch, T., Erlwein, S., Reischl, A., Rahman, M., Pretzsch, H., Rötzer, T. (2022): Urban green infrastructures for climate change adaptation: a multiscale approach. In: Costanzo V., Evola G., Marletta L. (Eds.). *Urban Heat Stress and Mitigation Solutions. An Engineering Perspectives*. Routledge, Oxon and New York, pp. 301-322.
- Pauleit S., Gulsrud, N., Raum, S., Taubenböck, H., Leichtle, T., Erlwein S., Rötzer T., Rahman M., Moser-Reischl, A. (2022): Smart Urban Forestry: is it the future? In: Chokhachian, A., Hensel, M.U., Perini, K. (Eds.) *Informed urban Environments*. Springer Nature, Switzerland.
- Rahman, M. A., Franceschi, E., Pattnaik, N., Moser-Reischl, A., Hartmann, C., Paeth, H., Pretzsch H., Rötzer, T., Pauleit, S. (2022): Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress: influence of urban land cover types. *Scientific Reports* 12: 671, doi: 10.1038/s41598-021-04669-8.
- Roloff, A., Pietzarka, U., Gillner, S. (2022): Baumartenverwendung im Klimawandel: KlimaArten-Matrix 20211 (KLAM 2.0) und Empfehlungen zu Baumgrößen, -pflanzungen und -umfeld. *Jahrbuch der Baumpflege* 2022: 204-223. Haymarket Media, Braunschweig.
- Rötzer T., Moser-Reischl A., Rahman M.A., Grote R., Pauleit S., Pretzsch H. (2021): Modelling Urban Tree Growth and Ecosystem Services: Review and Perspectives. In: *Progress in Botany*. Springer, Berlin, Heidelberg; 82: 405 – 464; doi: 10.1007/124_2020_46.
- Rötzer, T., Reischl, A., Rahman, M., Pretzsch, H., Pauleit, S. (2021): Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Stadtbäume – Wachstum, Umweltleistungen und Klimawandel. Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung, 72 Seiten.
- UN (2022): World Cities Report 2022. Envisaging the Future of Cities. United Nations Human Settlements Programme - Headquarters. ISBN 978-92-1-132894-3.

Abbildungen

- 18 | **Abbildung 1** Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt
- 22 | **Abbildung 2** Blattformen der mit am häufigsten vorkommenden Stadtbaumarten in mitteleuropäischen Städten (Weller 2021)
- 32 | **Abbildung 3** Prozentanteil der Baumarten in mitteleuropäischen Städten (Weller 2021)
- 36 | **Abbildung 4** Strukturveränderungen von 12 Baumarten in Abhängigkeit des Stammdurchmessers
- 40 | **Abbildung 5** Das Modell CityTree und dessen Aufbau
- 43 | **Abbildung 6** Die Module des Modells CityTree
- 46 | **Abbildung 7** Ökosystemleistungen von Bäumen
- 48 | **Abbildung 8** Ausgewählte Städte in Deutschland
- 50 | **Abbildung 9** Stammdurchmesserklassen
- 52 | **Abbildung 10** Bodenversiegelung um den Baumstandort
- 54 | **Abbildung 11** Horizontabdeckung
- 58 | **Abbildung 12** Biomassezuwachs der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 59 | **Abbildung 13** CO₂-Fixierung der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 60 | **Abbildung 14** Abfluss unter den Bäumen der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 60 | **Abbildung 15** Wasserverbrauch der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 61 | **Abbildung 16** Sommerliche Kühlungsenergie durch Beschattung und Transpiration der 12 ausgewählten Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 62 | **Abbildung 17** Abhängigkeit des Biomassezuwachses von der Niederschlagssumme eines Standorts für sechs Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020

- 64 | Abbildung 18** Abhängigkeit des Biomassezuwachses von der Aridität (Trockenheit) eines Standorts für Winterlinden und Robinien (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet als Mittel über alle Städte für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 65 | Abbildung 19** Biomassezuwachs für alle Arten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten Berlin und München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 66 | Abbildung 20** CO₂-Fixierung für alle Arten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten Berlin und München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 67 | Abbildung 21** Abfluss unterhalb der 12 Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten Berlin und München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 68 | Abbildung 22** Zusammenhang von sommerlicher Kühlungsenergie (Transpiration und Beschattung) und Trockenheitsindex im Mittel über alle Städte für Winterlinden und Robinien (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 69 | Abbildung 23** Kühlleistung durch Transpiration und Beschattung im Sommer für 12 Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in den Städten Berlin und München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei 0 % Bodenversiegelung und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Durchschnitt der Jahre 1991-2020
- 70 | Abbildung 24** Einfluss des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers (nutzbare Feldkapazität) auf den Biomassezuwachs von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Würzburg berechnet bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020
- 72 | Abbildung 25** Einfluss des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers (nutzbare Feldkapazität) auf die Transpiration und den Abfluss unter dem Baum für sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Würzburg berechnet bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020
- 73 | Abbildung 26** Einfluss des pflanzenverfügbaren Bodenwasserspeichers (nutzbare Feldkapazität) auf die Kühlung durch Transpiration im Sommer von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Würzburg berechnet bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020

- 74 | Abbildung 27** Einfluss der Bodenversiegelung auf den Biomassezuwachs von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Würzburg berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020
- 75 | Abbildung 28** Einfluss der Bodenversiegelung auf die Transpiration und den Abfluss unter dem Baum von sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Würzburg berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020
- 77 | Abbildung 29** Einfluss der Bodenversiegelung auf die Kühlung durch Transpiration im Sommer bei sieben Baumarten (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Würzburg berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung, im Mittel der Jahre 1991-2020
- 78 | Abbildung 30** Einfluss der Horizontüberhöhung (Sky View Faktor, SVF) auf den Zuwachs der Biomasse und der Kronenprojektionsfläche von Robinie und Buche (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 0 % im Mittel der Jahre 1991-2020
- 79 | Abbildung 31** Einfluss der Horizontüberhöhung (Sky View Faktor, SVF) auf die Transpiration und den Abfluss von Robinie und Buche (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 0 % im Mittel der Jahre 1991-2020
- 79 | Abbildung 32** Einfluss der Horizontüberhöhung (Sky View Faktor, SVF) auf die Kühlung durch Transpiration im Sommer von Robinie und Buche (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 0 % im Mittel der Jahre 1991-2020
- 80 | Abbildung 33** Einfluss von Klimaveränderungen auf die CO₂-Fixierung von Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Berlin für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung
- 81 | Abbildung 34** Einfluss der Klimaveränderungen auf die Kühlwirkung durch Transpiration im Sommer von Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Berlin berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung
- 82 | Abbildung 35** Einfluss von Klimaveränderungen auf den Wasserverbrauch von Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Berlin berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung
- 83 | Abbildung 36** Einfluss von Klimaveränderungen auf den Abfluss unter den Baumarten Winterlinde und Robinie (Durchmesserklasse 50 - 60 cm) in München und Berlin berechnet für die Bodenart lehmiger Sand bei einer Bodenversiegelung von 50 % und einer Horizontüberhöhung von 1,0; d. h. ohne Horizonteinschränkung

Tabellen

- 33 | Tabelle 1** Häufige Stadtbaumarten in Mitteleuropa und deren Herkunft sowie Toleranzen gegenüber Beschattung, Trockenheit und Staunässe;
(Quelle: Herkunft: GALK Straßenbaumliste, Roloff 2013, Toleranzen: Niinemets und Valladares 2006)
- 47 | Tabelle 2** Ökosystemleistungen von Stadtgrün (Auswahl)
- 49 | Tabelle 3** Geographie und Klima der Städte
- 51 | Tabelle 4** Eigenschaften der ausgewählten Arten
(Quelle: Mitchell 1979; Franceschi et al 2022; GALK 2018; Roloff 2013; Telewski et al. 1996)
- 53 | Tabelle 5** Bodenarten und deren Eigenschaften
- 56 | Tabelle 6** Jahresmitteltemperatur und Jahressummen des Niederschlags der ausgewählten Städte:
- im langjährigen Mittel (1991-2020),
- für das Trockenjahr 2003
- für die Klimaszenarien RCP 2.6 und RCP 8.5 der Jahre 2081-2090

Abkürzungen

BHD	Brusthöhendurchmesser, Stammdurchmesser eines Baumes auf 1,3 m
BWGPFI	Pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt
CPA	Crown Projection Area, Kronenprojektionsfläche
GALK	Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz
ISIMIP	Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project
NSC	Non Structural Carbon
RCP	Representative Concentration Pathway
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
SVF	Sky View Faktor
UHI	Urban Heat Island, Städtischer Wärmeinseleffekt
ZSK	Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung

Glossar

Begriffserklärungen

A

Allometrie Größenvergleich bzw. Proportionsverhältnisse einzelner Organe von Pflanzen wie z. B. Stamm-Laub oder BHD-Kronenvolumen

Anisohydrische Baumart Hydrolabile (anisohydrische) Arten besitzen eine hohe stomatäre Leitfähigkeit und können bei geringen Wasserverfügbarkeiten weiterhin Photosynthese betreiben

B

Baumbestand Vorhandene Bäume in einer Stadt

Baumkataster Verzeichnis zur Verwaltung des Baumbestands einer Stadt

Bestimmtheitsmaß Statistisches Gütemaß einer Regression

Blattflächenindex Blattfläche pro Bodenoberfläche m^2/m^2

Bodenversiegelung Undurchlässige Bodenoberfläche

Brusthöhendurchmesser (BHD) Stammdurchmesser gemessen auf Brusthöhe (1,3 m)

D

Dunkelatmung Zellatmung

E

Evaporation Verdunstung von Wasser und von unbewachsenen Oberflächen

Evapotranspiration Summe aus Transpiration und Evaporation

F

Feldkapazität Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft halten kann

Freiraum Nicht durch Gebäude bebaute Flächen, z. B. Park, Platz, Straße

I

Interzeption Anteil des Niederschlages, der an den Pflanzen haften bleibt und ungenutzt verdunstet

Isohydrische Baumart Hydrostabile (isohydrische) Arten reagieren auf Trockenstress mit einer Verringerung der stomatären Leitfähigkeit zur Reduzierung von Wasserverlust, was bei lang anhaltender Trockenheit zu Einbußen beim Wachstum führen kann

K

Klimaresilient Robust gegenüber klimatischen Veränderungen

Klimawandel Auftretende Veränderungen des Klimas auf der Erde

L**Lichtbaumart**

Baumart, die ein bestimmtes Minimum an Licht für das Wachstum benötigt, zumeist zeigen solche Baumarten ein sehr schnelles Anfangswachstum

Lichtgenuss

Lichtmenge, die an einem Pflanzenstandort vorliegt

P**Permanenter Welkepunkt**

Austrocknungsgrad des Bodens, unter dem es zur irreversiblen Welke der Pflanze kommt

**Pflanzenverfügbare
Bodenwassergehalt**

Bodenwassergehalt, der von den Pflanzen aufgenommen werden kann

R**Raumanspruch**

Platz, den ein Baum zum Wachsen benötigt

Regionalklima

Klima einer Raumeinheit auf der Mesoskala, deren horizontale Ausdehnung zwischen 5 und 100 Kilometern liegt

Ringporer

Ringporige Hölzer bilden im Frühjahr weitlumige Gefäße, also Gefäße mit relativ großem Durchmesser

S**Schattenbaumart**

Schattenbaumarten benötigen zum Wachstum weniger als ein Zehntel bis ein Hundertstel des Sonnenlichts als Lichtbaumarten

Standortverhältnisse

Eigenschaften eines Standorts bezüglich Klima, Wasserverfügbarkeit, Bodenversiegelung

Stomatäre Leitfähigkeit

Öffnungsgrad der Spaltöffnungen in der Epidermis der Blätter

Struktur / Strukturdimensionen

Baumparameter wie Höhe, Durchmesser, Kronengröße

T**Transpiration**

Verdunstung von Wasser durch Organismen

Trockentoleranz

Fähigkeit von Pflanzen, Dürreperioden zu überstehen

V**Verdunstungskühlung**

Abkühlung eines Mediums durch Entzug von Energie (Wärme), die durch die Verdunstung von Wasser entzogen wird

W**Wasserbedarf**

Menge des benötigten Wassers

**Wohlfahrtswirkungen /
Ökosystemleistungen /
Umweltleistungen**

Direkte und indirekte Leistungen von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen

Z**Zerstreutporer**

Zerstreut porige Hölzer bilden leitende Gefäße von annähernd gleicher Größe sowohl im Frühholz als auch im Spätholz

Impressum

Herausgeber

Technische Universität München
Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK)
Emil-Ramann-Str. 6
85354 Freising
info@zsk.tum.de
zsk.tum.de

Fördernummern: TUF01UF-64971, TLK01UFuE6939, TKP01KPB-81817

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde

Prof. Dr. Dr. Hans Pretzsch

Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung

Prof. Dr. Stephan Pauleit

Inhaltlich und konzeptionell verantwortlich

Prof. Dr. Thomas Rötzer
Technische Universität München
Hans-Carl-v.-Carlowitz-Platz 2
85354 Freising
thomas.roetzer@tum.de

Wissenschaftliche Mitarbeit

Dr. Astrid Reischl
astrid.reischl@tum.de
Eleonora Franceschi
eleonora.franceschi@tum.de

Layout & Grafik

Monika Bradatsch
monika.bradatsch@tum.de

Baumsilhouetten

Aczentrum Grafikbüro
info@aczentrum.de

Finanziert durch

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München

Zitationshinweis

Zitierung: Rötzer, T., Franceschi, E., Reischl, A., Rahman, M., Bradatsch, M., Pretzsch, H., Pauleit, S. (2024):
Leitfaden Stadtbäume im Klimawandel. Zweite, erweiterte Auflage des Leitfadens zu Stadtbäumen in Bayern.
Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung, Freising, 95 Seiten.

Stand: © 2024



Quelle: Pixabay – Stadtpark



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Weitere Informationen und den Zugang zur Online-Version des interaktiven Leitfadens finden Sie auf den Webseiten des Zentrums für Stadtnatur und Klimaanpassung unter www.zsk.tum.de.