Zentrum Stadtnatur
und Klimaanpassung

Leitfaden
zu Stadtbäumen in Bayern

Handlungsempfehlungen aus dem Projekt
Stadtbäume im Klimawandel –
Wuchsverhalten, Umweltleistungen und
Perspektiven

finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

Impressum

Herausgeber
Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung
Technische Universität München
Emil-Ramann-Straße 6, 85354 Freising

Teilprojekt 3: Stadtbäume im Klimawandel – Wachstum, Umweltleistungen und Perspektiven
(Förderkennzeichen TLK01UFuE69397)

Lehrstuhl für Waldwachstumskunde
Prof. Dr. Dr. Hans Pretzsch
Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung
Prof. Dr. Stephan Pauleit

Bearbeitung
Prof. Dr. Thomas Rötzer
Dr. Astrid Reischl
Dr. Mohammad Rahman

Wissenschaftliche Hilfskräfte
Alexander Hellwig, Claudia Chreptun, Karin Beer, Jean-Marie Schweig

Lektorat
Dr. Volker Zapf

Layout
Aczentum Grafikbüro

Finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München

Zitierhinweis
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

Titelfoto
Stephan Pauleit – Riemer Park in München

Besonderer Dank gilt den Vertreter*innen der Partnerstädte München, Würzburg, Nürnberg, Bayreuth, Kempten und Hof für ihren wertvollen Input während der Datenaufnahme und der Erstellung dieses Leitfadens.

Leitfaden
zu Stadtbäumen in Bayern

Handlungsempfehlungen aus dem Projekt
Stadtbäume im Klimawandel –
Wuchsverhalten, Umweltleistungen und
Perspektiven

Inhalt

4 Inhaltsverzeichnis

7 Vorworte

10 Das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung

12 Zusammenfassung

13 Die wichtigsten Handlungsempfehlungen für Kommunen

16 Abstract

17 Key messages for urban planners and municipalities

19 **1 | Anwendungsbereich des Leitfadens**

20 1.1 | Bäume in der Stadt und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt

21 1.2 | Das Projekt „Stadtbäume im Klimawandel“

21 1.3 | Aufbau und Nutzen des Leitfadens

23 **2 | Das Stadtklima heute und in naher Zukunft**

27 **3 | Stadtklima und Baumwachstum**

33 **4 | Ökosystemleistungen von Bäumen**

34 4.1 | Überblick

35 4.2 | Relevanz

37 **5 | Modellierungshintergrund**

38 5.1 | Beschreibung des Wachstumsmodells CityTree

39 5.2 | Auswahl der Baumarten

41 **6 | Wachstum, Struktur und Ökosystemleistungen einzelner Baumarten in bayerischen Städten**

45 6.1 | Dimensionsveränderungen

49 6.2 | Beschattung

51 6.3 | Biomassezuwachs, CO_2-Fixierung, Transpiration und Kühlung

59 6.4 | Auswirkungen kleinräumiger Standortbedingungen

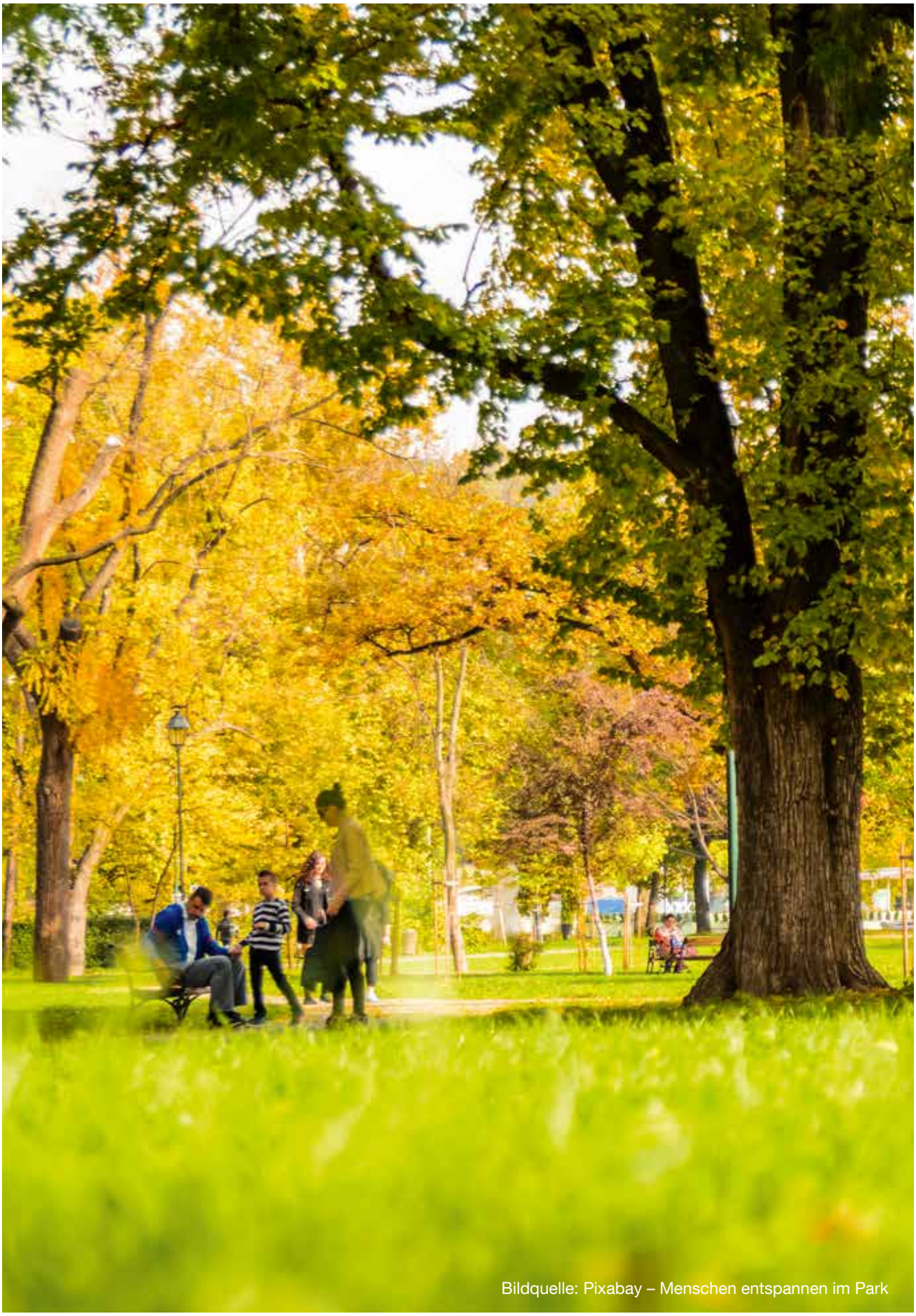
63 **7 | Anleitung mit Beispielen**

68 **Abbildungsverzeichnis**

69 **Tabellenverzeichnis/Literaturverzeichnis**

70 **Abkürzungsverzeichnis**

71 **Glossar/Anhang**



Bildquelle: Pixabay – Menschen entspannen im Park

Sehr geehrte Damen und Herren,

Der aktuelle Klima-Report für Bayern zeigt: Der Klimawandel ist Fakt. In Bayern wird es zunehmend warm und trocken. Das stellt uns vor vielfältige Herausforderungen: dazu zählt die Sicherstellung der Wasserversorgung in der Fläche genauso wie der Schutz der Artenvielfalt und durchdachte Maßnahmen gegen den Temperaturanstieg. Der Klimawandel wird in Bayern zu mehr Hitzetagen und Tropennächten führen. Der Klimawandel verändert damit vor allem auch das Leben in unseren Siedlungen. Die Städte heizen sich auf wie ein Kachelofen. Auf der anderen Seite drohen häufigere extreme Hochwasser und Starkregen. Deshalb brauchen wir ein Konzept für die Städte und Gemeinden der Zukunft.

Dazu kommen die Aspekte Gesundheit und Lebensqualität. Glücklich, wer zurzeit die Möglichkeit hat, sich wohnortnah im Grünen und an der frischen Luft zu bewegen! Bäume und Grünanlagen haben vor allem in städtischen Ballungsräumen für unser körperliches und seelisches Wohlbefinden einen außergewöhnlich positiven Effekt. Eine gesunde Umwelt ist eng mit unserer eigenen Gesundheit verbunden und städtische Grünanlagen und Stadtbäume wirken hier auf vielfältige Weise. Sie sind natürliche Luftfilter. Stadtbäume kühlen und befeuchten die Luft und wirken so wie eine natürliche Klimaanlage. Frischluftschneisen, grüne Lungen und Stadtbäume werden damit nicht nur zur Frage eines schönen Stadtbildes oder urbaner Lebensqualität. Sie sind auch ein wichtiger Baustein für vorsorgenden Gesundheitsschutz. Eine kluge Stadtplanung im Klimawandel hat sie konsequent auf der Agenda.

Sauberes Wasser, reine Luft, gesunde Böden, artenreiche Natur und ein ausgeglichenes Klima erhöhen unsere Widerstandsfähigkeit gegen Krisen! Hier will der vorliegende Leitfaden helfen. Er zeigt ganz konkret, wie in jeder Kommune Stadtbäume im komplexen Geflecht von Planungsanforderungen und diversen Interessen nachhaltig zur Geltung gebracht werden können, um ihre ökologischen und klimatischen Leistungen für die Stadt und ihre Menschen bestmöglich zu nutzen. Ich danke dem Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung für diese wichtige Grundlagenarbeit, von der alle Kommunen in Bayern profitieren können.

Thorsten Glauber, MdL
Bayerischer Staatsminister für Umwelt und Verbraucherschutz

Bildquelle: Stephan Pauleit – München, Hofgarten

Sehr geehrte Damen und Herren,

Wenn einer eine Reise plant, dann nimmt er mit …
Wenn das Reiseziel bekannt ist, ist es ganz einfach. Aber was macht man, wenn das Ziel nur vage und nicht wirklich bekannt ist? Die Städte und Gemeinden und wir alle sind auf einer Reise zum Klimawandel. Die Richtung ist bekannt, doch ahnen wir eher, was uns dort erwarten wird. Wir haben keine Möglichkeit den Koffer unendlich zu vergrößern, um uns auf alle Eventualitäten und auf die unterschiedlichsten Bedingungen vorzubereiten. Hier brauchen wir eher einen kompakten Werkzeugkoffer mit multifunktionalen Reaktionsmöglichkeiten.

Städte werden immer enger und die ausgleichenden Grünräume immer kleiner. Der Aufbau und die Sicherung von Grünräumen in der Stadt ist zudem eine überaus komplexe Planungsaufgabe. Sie muss mit einer Vielzahl von Partnern abgestimmt und mit durchaus konkurrierenden Planungsbedürfnissen im Stadtraum abgewogen werden. Während rein gestalterische Aspekte des Stadtgrüns leicht gegen andere Planungsaufgaben abfallen könnten, entspricht eine innerstädtische Grundversorgung von Ökosystemleistungen durch Bäume ganz offensichtlich einer großen Bedeutung für das Allgemeinwohl. Insbesondere aufgrund der intensiven Kühlungsleistungen durch Verschattungen und Evapotranspiration von Bäumen wird die Aufenthaltsqualität in Freiräumen an heißen Tagen deutlich verbessert und hilft entscheidend mit, Städte an die Auswirkungen des Klimawandels anzupassen. Doch fragen sich viele Planerinnen und Planer, wie man diese pflanzlichen „Kühlaggregate“ in den Städten am besten einsetzt, unter welchen Bedingungen sie am wirksamsten das Mikroklima beeinflussen können und gleichzeitig wichtige andere Ökosystemleistungen erbringen, etwa die Speicherung von Kohlenstoff.

Der vorliegende Leitfaden entspricht genau diesen Fragestellungen. Es analysiert zukünftige Problemfelder, schafft Lösungsansätze und gibt einen Mindestbedarf an Vorsorgealternativen wieder. Mit großer Freude ist festzustellen, dass hier wesentliche Grundbausteine eines multifunktionalen Werkzeugkoffers für das Stadtgrün der Zukunft gesetzt worden sind. Es wird langfristig helfen, Klimaanpassung durch Bäume in der Stadt noch besser zu planen und verständlich zu machen.

Swantje Duthweiler

Prof. Dr. Swantje Duthweiler
Vorsitzende Bund Deutscher Landschaftsarchitekten (bdla) Bayern

ZSK

Das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK)

Das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) wurde 2013 gegründet und besteht aus mehreren interdisziplinären Teilprojekten, die sich mit den Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels in der Stadt beschäftigen. Das ZSK bringt die vielfältigen Kompetenzen von natur-, sozial- und ingenieurwissenschaftlichen Forschungseinrichtungen (Universitäten, Landesanstalten), bayerischen Kommunen und Städten, sowie den Partnern der Bayerischen Klima-Allianz (www.klimawandel-meistern.bayern.de) und der Umweltinitiative Stadt.Klima.Natur des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) zusammen, um das Thema *Klimawandel in der Stadt* fachübergreifend, ganzheitlich und praxisnah zu bearbeiten.

Das ZSK arbeitet dabei an Fragestellungen rund um das Thema der klimaresilienten, nachhaltigen und grünen Stadt und wie diese mit Hilfe der Ökosystemleistungen der Stadtnatur wie Beschattung, Befeuchtung und Kohlenstoffbindung an die Folgen des Klimawandels angepasst werden kann. Das interdisziplinäre Team aus Wissenschaftler*innen erarbeitet Handlungsempfehlungen für Städte und Kommunen in Bayern. Dabei sollen insbesondere die Synergieeffekte genutzt werden, die sich aus den verschiedenen Fachrichtungen (u. a. Naturwissenschaften, Architektur, Soziologie, Landschaftsplanung) und Kommunen, sowie von Anwender*innen und Entscheidungsträger*innen ergeben, um Flora und Fauna in der Stadt in Zeiten des Klimawandels gleichermaßen ein Refugium zu bieten und langfristig zu schützen. In enger Zusammenarbeit mit kommunalen Partnern, wie der Stadt Bayreuth, der Stadt Hof, der Stadt Ingolstadt, der Stadt Kempten, der Landeshauptstadt München, der Stadt Nürnberg und der Stadt Würzburg, werden Problemstellungen der urbanen Klimaanpassung in der Praxis durchleuchtet und zukunftsweisende Lösungswege aufgezeigt. Neben wissenschaftlichen Untersuchungen zum Stadtklima, zur Bebauungsstruktur sowie zu Flora und Fauna in der Stadt geht es auch darum, Menschen für die Themengebiete der modernen, klimaresilienten Stadtplanung, Klimaanpassung und Ökosystemleistungen zu sensibilisieren.

Das ZSK wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert und an der Technischen Universität München koordiniert. Mehr Informationen bietet der Internetauftritt www.zsk.tum.de.

Zusammenfassung

Bäume sind ein prägender Bestandteil des Stadtgrüns. Der vorliegende Leitfaden stellt für die nachhaltige und klimaresiliente Entwicklung der Stadtbaumbestände in bayerischen Städten wichtige, praxisnahe Informationen bereit. Für die häufig in Städten gepflanzten Baumarten Winterlinde *Tilia cordata,* Rosskastanie *Aesculus hippocastanum,* Platane *Platanus x acerifolia* und Scheinakazie (Robinie) *Robinia pseudoacacia* kann aus dem Leitfaden das zu erwartende Baumwachstum (Baumhöhe, Kronendurchmesser, Stammdurchmesser) in Abhängigkeit vom Alter der Bäume entnommen werden, etwa um ihre Raumansprüche zu ermitteln. Die in dem Leitfaden dargestellten Ergebnisse beruhen auf der Untersuchung von über 2.000 Bäumen in den Städten Bayreuth, Hof, Kempten, München, Nürnberg und Würzburg und sind damit statistisch gut abgesichert.

Die Ökosystemleistungen der Bäume, z. B. Kohlenstoffspeicherung oder Kühlwirkung durch Verschattung und Verdunstung, werden für die unterschiedlichen Baumarten nach Altersklassen dargestellt. Auch der Einfluss von Bodenart, zunehmender Bodenversiegelung und Lichtgenuss auf das Baumwachstum und die Ökosystemleistungen der Bäume werden für die vier Baumarten aufgezeigt. Von besonderer Bedeutung ist eine Modellierung des Wachstums und der Ökosystemleistungen für zukünftige Klimabedingungen in Bayern und auf Stadtebene, die zum Teil eine deutliche Veränderung der erbrachten Ökosystemleistungen und des Wachstums aufzeigt. Die Veränderungen sind vor allem von der Baumart und den spezifischen Arteigenschaften wie Trockentoleranz und Wasserbedarf, d. h. der Sensitivität gegenüber der Bodenversiegelung, abhängig. Unter veränderten Klimabedingungen können durch einen Klimahotspot wie Würzburg bei Baumarten mit einem hohen Wasserbedarf wie z. B. Winterlinden signifikante Wachstumseinbußen auftreten, was sich auch in einer Verringerung der bereitgestellten Ökosystemleistungen widerspiegelt. Für solche Standorte sind unter Berücksichtigung zukünftiger Klimabedingungen Arten mit einem geringen Wasserverbrauch und einer hohen Trockenheitstoleranz wie die Scheinakazie zu empfehlen. An Standorten mit voraussichtlich weiterhin guter Wasserversorgung in der Zukunft, wie beispielsweise Kempten, können auch Arten mit hohem Wasserbedarf wie die Winterlinde ihr Wachstumsoptimum erreichen und das Standortsklima positiv beeinflussen. Auf die kleinräumigen Standortsbedingungen ist jedoch zu achten.

Für die Stadtbaumbestände können anhand des Leitfadens aus dem Baumalter bzw. einfach zu erhebenden Merkmalen, wie dem Stammdurchmesser und der Höhe des Baumes deren Ökosystemleistungen abgeleitet werden. Für die Planung von neuen Baumpflanzungen lassen sich zu erwartende Wachstums- und Ökosystemleistungen der Bäume abschätzen. Der Leitfaden stellt auch Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung von städtischen Baumbeständen bereit.

Die wichtigsten Handlungsempfehlungen für Kommunen

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

Die Ergebnisse zeigen
- den Einfluss des Regionalklimas auf das Wachstum von Stadtbäumen heute und unter zukünftigen Klimawandelbedingungen,
- die Auswirkungen der städtischen Standortbedingungen, speziell der Faktoren Bodenversiegelung und Lichtverfügbarkeit, auf das Baumwachstum,
- die Wuchsleistungen der vier Arten Platane, Winterlinde, Rosskastanie und Scheinakazie. Unterschiedliche Wuchsleistungen sind das Ergebnis der genetischen Prägung der Baumarten. Sie werden jedoch auch durch das Regionalklima und die jeweiligen Standortverhältnisse entscheidend beeinflusst,
- die daraus resultierenden unterschiedlichen Ökosystemleistungen der untersuchten Baumarten.

Es lassen sich folgende Schlussfolgerungen und Empfehlungen für Kommunen ableiten:

1. Den städtischen Baumbestand kennen und planen

Bäume sind ein bedeutender Bestandteil des städtischen Grüns. Selbst wenn nur die Bäume in öffentlichen Frei- und Grünflächen betrachtet werden, handelt es sich um viele tausende bis hunderttausende Bäume. Ein Vielfaches mehr ist auf privaten Freiräumen zu finden. Die Ökosystemleistungen dieser Bestände sind entscheidend für die Lebens- und Umweltqualität in der Stadt und ihre Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel. Jede Stadt sollte daher über eine gute Kenntnis ihrer Baumbestände verfügen. Dazu sind Baumkataster im öffentlichen Raum erforderlich. Denn nur was man kennt, kann geschützt und pfleglich entwickelt werden.

Auch für Bäume auf privaten Grundstücken sollte durch Monitoringverfahren, wie Stichprobenerhebungen ein Überblick über den Bestand und seine Veränderung geschaffen werden. Entsprechende Informationen lassen sich inzwischen aus Fernerkundungsdaten wie Luft- und Satellitenbildern und ergänzenden Felderhebungen mit vertretbarem Aufwand gewinnen. Baumprogramme mit klaren Zielen und Maßnahmen können die strategische Entwicklung der städtischen Gehölzbestände fördern und als Grundlage für die Stadt- und Landschaftsplanung sowie für andere Fachplanungen dienen. Für die nachhaltige Sicherung und Entwicklung des Baumbestands ist Bürger*innenengagement wichtig und sollte durch geeignete Maßnahmen wie etwa Informationskampagnen gefördert werden. Aktionen zur temporären Begrünung von Straßenzügen, z. B. durch „Wanderbaumalleen“, können ebenfalls das Bewusstsein für das Stadtgrün erhöhen.

2. Standortverhältnisse für langfristig gesunde und leistungsfähige Stadtbaumbestände optimieren

Die Untersuchungen zeigen klare Zusammenhänge zwischen den Standortbedingungen und dem Wachstum, sowie den davon abhängigen Ökosystemleistungen der Bäume. Bei allen untersuchten Baumarten nimmt der Zuwachs deutlich mit steigender Versiegelung ab. Mit zunehmender Flächenversiegelung verringert sich bei der Winterlinde und der Kastanie die Verdunstung stark, während die Scheinakazie und die Platane weniger intensiv reagieren. So reduziert sich die Verdunstung einer 60-jährigen Scheinakazie bei einer doppelt so starken Versiegelung (0 % zu 50 %) nur um 3,6 m^3 (= 10 %), während sich bei einer ebenfalls 60-jährigen Winterlinde bei ähnlicher Versiegelung die Verdunstung um 12,2 m^3 verringert (= 31 %). Insgesamt büßen an hochversiegelten Standorten jedoch alle Baumarten entscheidend an Ökosystemleistungen, wie der CO_2-Speicherung, der Verdunstung und der Luftkühlung durch Transpiration ein. Zur Verbesserung der Standortsbedingungen bieten sich ausreichend große Pflanzgruben an. Bereits heute gilt etwa in der Landeshauptstadt München, dass ein Großbaum 36 m^3 durchwurzelbaren Raum erhält (Landeshauptstadt München, 2016). Dies entspricht einer Baumgrube mit den Dimensionen 6 m x 4 m x 1,5 m (L x B x T). Für zukünftige Pflanzungen von Großbäumen an Straßen und versiegelten Plätzen ist dieses Volumen als notwendiges Minimum zu betrachten (Landeshauptstadt München, 2016).

Auch oberirdisch sind die Raumansprüche der Stadtbäume zu berücksichtigen. Mithilfe des Leitfadens lassen sich die zu erwartenden Dimensionen von Großbaumarten im Laufe ihres Wachstums ermitteln. So lässt sich etwa ablesen, dass eine 80 Jahre alte Platane mit einer durchschnittlichen Höhe von 28 m, einem Kronendurchmesser von 24 m und einem Kronenvolumen von 7.000 m^3 sehr viel Platz beanspruchen wird, dafür aber auch hohe Leistungen bereitstellen kann. Dagegen kann eine Rosskastanie im gleichen Alter im Mittel bei 19 m Höhe nur 13 m Kronendurchmesser und ein Kronenvolumen erreichen, das mit etwa 1.700 m^3 nur etwa ein Viertel so groß ist wie das der Platane. Diese Raumansprüche sind auch zu beachten, um Konflikte mit Gebäuden und anderen Einrichtungen zu vermeiden, die zur Fällung der Bäume oder zu aufwendigen, teuren Pflegemaßnahmen durch Kronenschnitt führen können. Zuwenig oberirdischer Raum resultiert ferner in verminderten Lichteinfall und damit in vermindertem Wachstum. Besonders Lichtbaumarten wie die Scheinakazie reagieren hierauf empfindlich. In der Frei- und Grünflächenplanung sind diese Standortansprüche frühzeitig und umfassend zu berücksichtigen. Ungeeignete Verhältnisse können auch von robusten Arten, wie der Platane nicht ausreichend kompensiert werden, besonders bei sich verschlechternden Wuchsbedingungen durch den Klimawandel.

3. Ökosystemleistungen mit einer standortangepassten Baumartenwahl fördern

Die Wahl geeigneter Baumarten ist eine Voraussetzung für langlebige und klimatoleranter Baumbestände mit hohen Umweltleistungen. Den vorgenannten ober- und unterirdischen Platzansprüchen und der Trockentoleranz ist dabei besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Bei guter Wasserversorgung können Baumarten wie die Winterlinde und insbesonders die Platane hohe Biomassezuwächse erzielen und durch ihre hohe Verdunstungsleistung die Luft kühlen, während die Rosskastanie und die Scheinakazie in ihren Leistungen gegenüber den vorgenannten Baumarten deutlich zurückbleiben. Baumarten wie die Scheinakazie sind wiederum weniger empfindlich gegenüber einer Einschränkung der Wasserversorgung. Besonders Winterlinden und Rosskastanien zeigen Wachstumseinbußen von bis zu 40 % bei niedriger Wasserverfügbarkeit, während bei der Scheinakazie kaum eine Reduktion bei der Produktivität zu beobachten ist. Dementsprechend geringer fallen die Einbußen an Ökosystemleistungen bei der Scheinakazie unter Wasserstress aus, etwa hinsichtlich der Verdunstungskühlung.

Entscheidungen zur Baumartenwahl sollten daher auf sorgfältigen Kenntnissen der Standortverhältnisse beruhen. Besonders die Wasserverfügbarkeit ist dabei ausschlaggebend. In Städten wie Würzburg ist die Wahl trockenheitstoleranter Baumarten wie der Scheinakazie sehr wichtig, in Kempten und München ermöglichen höhere Niederschlagsmengen im Sommerhalbjahr auch der Winterlinde ein gutes Wachstum, sofern die Baumgruben ausreichend groß sind. Bei eingeschränktem Wurzelraum, wie er an Straßen und auf Stadtplätzen fast immer gegeben ist, sind aber oftmals trockenheitstolerante Baumarten wie z.B. die Scheinakazie die bessere Wahl (GALK, 2018; Böll, 2018).

4. Baumartenwahl an den Klimawandel anpassen

Die derzeitigen Wuchsbedingungen ändern sich. In Bayern wird es heißer und trockener im Sommerhalbjahr, während es im Winterhalbjahr zu erhöhten Niederschlagsmengen kommen kann (StMUV, 2021). An Extremstandorten wie hochversiegelten Straßenzügen und Stadtplätzen werden heute noch viel gepflanzte Baumarten wie die Winterlinde zukünftig nicht mehr gesund und stabil wachsen, weil ihnen während der Wuchsperiode das Wasser fehlt. Der erhöhte Wasserbedarf ist in die Dimensionierung von zukünftigen Baumgruben einzuplanen. Auch Bewässerung kann die Wuchsbedingungen für Bäume verbessern. Sie ist aber nur dann eine wirklich nachhaltige Lösung, wenn sie aus örtlich gespeichertem Regenwasser gespeist werden kann. Solche Konzepte, etwa für „BlueGreenStreets“, werden jetzt beispielsweise in Hamburg entwickelt und erprobt (BlueGreenStreets, 2020).

Der Leitfaden zeigt, dass der Baumartenwahl große Aufmerksamkeit für klimawandelangepasste Stadtbaumbestände geschenkt werden muss. Baumarten wie die Scheinakazie sind deutlich besser an extreme Dürreereignisse in den zunehmenden Hitzesommern angepasst als Winterlinde und Rosskastanie. Daher sind Baumarten wie die Scheinakazie und eine Reihe weiterer Baumarten (GALK, 2018; Roloff, 2008; Böll, 2018) für Straßenstandorte mit eingeschränktem Wurzelraum sowohl bei Neu- als auch bei Ersatzpflanzungen zu bevorzugen. Hier ist ein Umdenken in Bezug auf die heute noch geläufige Praxis erforderlich, Baumarten wie die Winterlinde aus ästhetischen Gründen zu bevorzugen.

Urbane Klimamodelle können inzwischen kleinräumig hochaufgelöste Klimaprognosen liefern, jedoch bleiben lokale Unsicherheiten. Dies betrifft auch das künftige Auftreten von neuen Baumschädlingen. Daher muss der Diversifizierung der Baumarten besondere Priorität eingeräumt werden. Die Diversifizierung der verwendeten Baumarten ist auch wichtig, weil Baumarten verstärkt von Schädlingen betroffen werden. Diversifizierung bedeutet dabei gleichzeitig die Förderung der Biodiversität, etwa der Vögel und Insekten, sowie der Robustheit der Baumbestände in Jahren mit schwierigen Witterungsverhältnissen, etwa bei ausgedehnten Hitzewellen und Dürreperioden.

Abstract

Urban trees, i.e. single trees at street canyons, public places, in private gardens etc., are an essential part of urban green. The present guideline contains important information for a sustainable development of urban trees in Bavarian cities. The presented results are based on studies of more than 2,000 trees in the cities Bayreuth, Hof, Kempten, München, Nürnberg and Würzburg and are therefore statistically valid. With this guideline, the expected tree growth (tree height, crown diameter, diameter at breast height) can be derived for the common urban tree species small-leaved lime, horse chestnut, London plane tree and black locust depending on the age of the trees, for example to determine the required space of a tree.

Moreover, the ecosystem services of the trees, e.g. their carbon storage, the cooling effect by shading and by transpiration, are presented for the different tree species in ascending age classes. The influence of the soil type, increasing soil sealing and light exposure on tree growth and ecosystem services are presented for the four tree species. Of particular significance is the modelling of tree growth and ecosystem services for future climate conditions in Bavaria and at city level, which partly illustrates a tremendous change of the provided ecosystem services and tree growth. These changes are depending on the tree species and species characteristics such as drought tolerance and water requirements, which represent the sensitivity of trees to soil sealing. At extreme sites like Wuerzburg and with changed climate conditions, trees with a higher water demand such as small-leaved limes might suffer of distinct growth declines leading to a decrease in provided ecosystem services. Under future climate conditions, we thus recommend species such as the black locust for sites, which require low water demand and a high drought tolerance. At sites with a continuously good water provision also under future climate conditions such as Kempten, species with a high water demand can still reach their growth optimum and positively influence the climate of their location.

For existing urban trees the guideline provides an easy tool to derive the provided ecosystem services of a tree by knowing the age of a tree or by easily measurable characteristics such as the diameter as breast height and tree height. For the planning of new plantings, the expected tree growth and ecosystem services can be estimated. The guideline also contains recommendations for the future development of urban tree populations.

Key messages for urban planners and municipalities

This guideline presents results of an extensive analysis of urban trees in six Bavarian cities. The aim is to provide practical information for a sustainable and climate adapted development of the urban tree populations. The results are based on the analysis of more than 2,000 urban trees of four different tree species and the calculation of their ecosystem services with the newly developed simulation model CityTree.

The results show

- the influence of the regional climate on the present growth of urban trees and the growth under future climate conditions,
- the effects of urban growth conditions on tree growth, especially in terms of soil sealing and light availability,
- the different growth performances of the urban tree species London plane tree, small-leaved lime, horse chestnut and black locust. These differences are the result of the genomic imprinting of the tree species. However, they are also markedly influenced by the regional climate and site conditions,
- that each species hence provides significantly different ecosystem services.

Based on the results of the analysis, the following recommendations for planners and municipalities can be deduced:

1. Know and plan the urban tree population.

2. Optimize the site conditions for the long-term preservation of vital and efficient urban tree populations.

3. Foster the provided ecosystem services by a site-specific selection of urban trees.

4. Adapt the urban tree selection to climate change.

Bildquelle: Astrid Reischl – Paradeplatz in Würzburg

Anwendungs-bereich
des Leitfadens

Anwendungsbereich des Leitfadens

1.1 Bäume in der Stadt und ihre Bedeutung für Mensch und Umwelt

Bäume sind ein prägender Bestandteil städtischer Frei- und Grünflächen und aus diesen nicht wegzudenken. 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 zu Raritäten, die man nur an wenigen Stellen antrifft, etwa dem nordamerikanischen Geweihbaum *Gymnocladus dioicus* oder der chinesischen Flügelnuss *Pterocarya stenoptera.*

Allein die Zahl der Bäume an 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). Sie alle 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. Der in Nordamerika geprägte Begriff „Urbaner Forst“ (Böll et al., 2019), der für die Gesamtheit der Baumbestände mit ihren Wohlfahrtswirkungen (Ökosystemleistungen) steht, ist daher auch für bayerische Städte zutreffend.

Bäume sind wichtig für die Verbesserung der Umweltverhältnisse in der Stadt (Ferrini et al., 2017; Roloff, 2013). Sie speichern Kohlenstoff und tragen somit zum Klimaschutz bei. Durch Verschattung und Verdunstungskühlung mindern sie die Lufttemperaturen (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 vermindern, indem sie das Regenwasser in der Krone auffangen und es zudem unter dem Baum zur Versickerung gelangt. Dadurch verringert sich das Risiko von lokalen Überschwemmungen durch die Überlastung der Kanalisation.

Bäume filtern Schadstoffe 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 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 Scheinakazie 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 deren unterschiedliche Ansprüche frühzeitig in der Frei- und Grünflächenplanung zu berücksichtigen. Wie viele Bäume sollen auf einem Platz gepflanzt werden, um an Hitzetagen ausreichend Schatten zu spenden, oder um zur urbanen Klimaanpassung beizutragen? Welche Pflanzfläche ist dafür erforderlich?

Bei Pflanzungen sollen die Standortansprüche 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 nicht nur deren Größe, sondern auch deren Struktur und Umweltleistungen und 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 einem Platz oder im Straßenraum, entwickeln werden.

- Wie groß werden Stadtbäume, wie breit ihre Krone?
- Wieviel Holz und Kohlenstoffvorräte entstehen?
- Um wieviel kühlen sie ihre Umgebung unter bestimmten Wuchsverhältnissen ab?
- Mit welcher Wuchsleistung ist bei einer Winterlinde im Straßenraum, auf einem Stadtplatz oder in einem Park im Vergleich zu einer Scheinakazie zu rechnen und was bedeutet das für ihre Ökosystemleistungen?
- Wie groß werden die Bäume im Alter von 60 Jahren sein?
- Wie werden sich das Baumwachstum und die Ökosystemleistungen durch den Klimawandel bei verschiedenen Baumarten ändern, welche Baumarten sind daher in Zukunft besser für die Verwendung in der Stadt geeignet?
- Wieviel CO_2 wird der Atmosphäre von einem Baum pro Jahr entzogen?

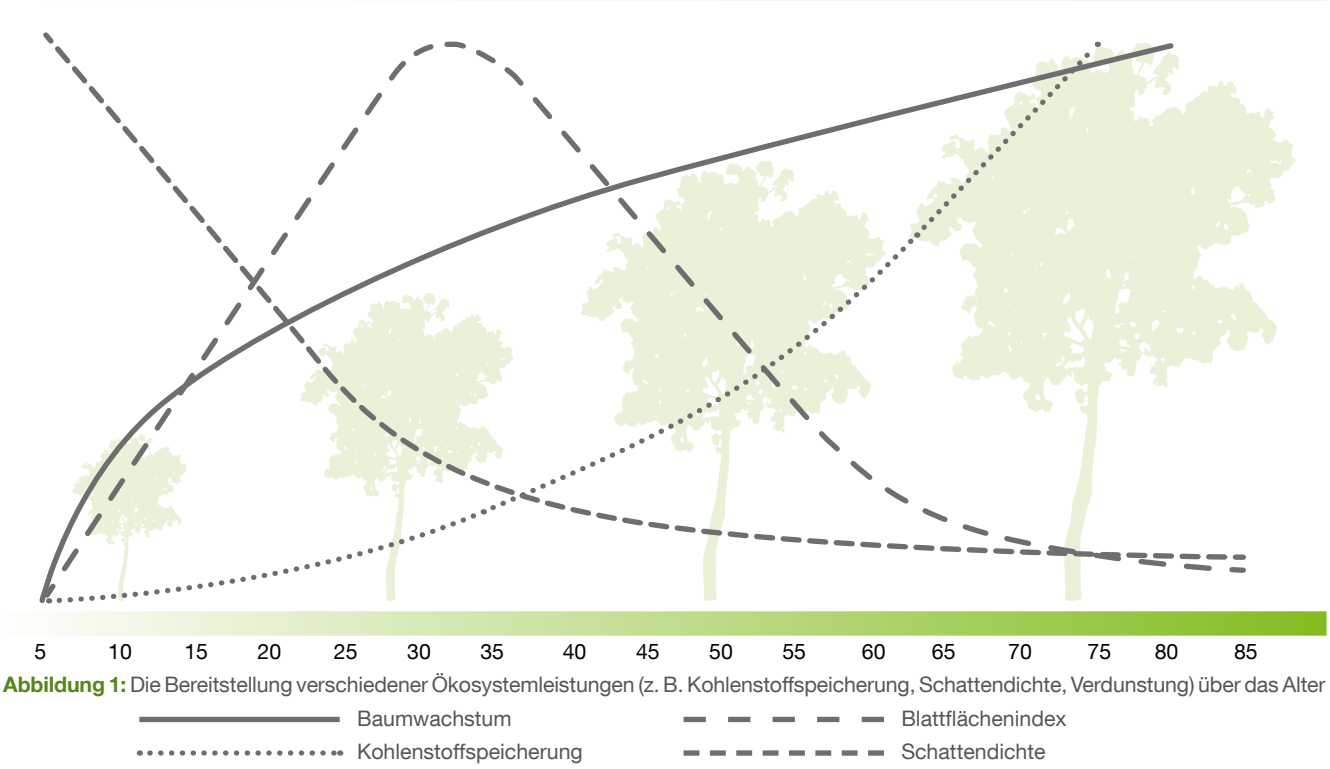


Abbildung 1: Die Bereitstellung verschiedener Ökosystemleistungen (z. B. Kohlenstoffspeicherung, Schattendichte, Verdunstung) über das Alter

1.2 Das Projekt „Stadtbäume im Klimawandel“

Für Stadtplanung und Landschaftsarchitektur fehlen bisher solche konkreten Informationen, mit denen sich optimierte Baumpflanzungen planen und Gestaltungsentwürfe entwickeln und überprüfen lassen. Der Leitfaden hilft, diese Lücke zu schließen. Auf Grundlage der Ergebnisse des Projekts „Stadtbäume im Klimawandel“ (2013–2018, unter dem Dach des ZSK) wird erstmals ein detailliertes Zahlenwerk zu Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in bayerischen Städten vorgelegt. Für ausgewählte Baumarten ist es möglich, Wachstum, Kohlenstoffspeicherung und Kühlwirkung in Abhängigkeit von Alter und Wuchsort abzuleiten. Mit Hilfe des vorliegenden Leitfadens können die Leistungen der vorhandenen Baumbestände sicher abgeschätzt und als Grundlage für Bestandsbewertungen sowie für die Prognose der möglichen Ökosystemleistungen geplanter Baumpflanzungen verwendet werden. Der Leitfaden unterstützt die Anpassung der Grünraumplanung in Städten an den Klimawandel.

Die Ergebnisse beruhen auf einer umfassenden Erhebung von Stadtbäumen in bayerischen Städten. Insgesamt wurden Bäume von vier Baumarten erfasst: Platane, Scheinakazie, Rosskastanie und Winterlinde. Diese häufigen Stadtbaumarten wurden ausgewählt, weil sie unterschiedliche Baumtypen repräsentieren (von Licht- bis Schattenbaumarten, Ring- bis Zerstreutporern, siehe Glossar) und sich die Erkenntnisse damit auch auf in ihren Eigenschaften ähnliche Baumarten zumindest qualitativ übertragen lassen. In Abbildung 1 werden schematisch das Wachstum und die Ökosystemleistungen (Kohlenstoffspeicherung, Abkühlungs- und Beschattungswirkung sowie Wasserverbrauch) dargestellt. Diese können mit dem neu entwickelten Simulationsmodell für Stadtbäume CityTree unter Verwendung der erhobenen Daten für gegebene Klimabedingungen und den Bedingungen eines veränderten Klimas der nahen Zukunft (2026–2050) für die ausgewählten Baumarten ermittelt werden. Eine genaue Darstellung der Vorgehensweise findet sich im Schlussbericht des Forschungsvorhabens (TIB - Rötzer & Pretzsch, 2018).

1.3 Aufbau und Nutzen des Leitfadens

Der Leitfaden ist in mehrere Abschnitte untergliedert. Zu Beginn werden Handlungsempfehlungen für Kommunen zur Sicherung und Entwicklung des Baumbestands erläutert. Die charakteristischen Merkmale des Stadtklimas und ihre Bedeutung für die Stadtplanung werden in **Kapitel 2** dargestellt. Dort wird zudem aufgezeigt, wie sich das Stadtklima in Zukunft verändern wird und welche Auswirkungen dies auf das Leben in der Stadt haben kann. Wichtige Determinanten für das Baumwachstum in der Stadt werden in **Kapitel 3** erörtert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf klimatischen Einflussfaktoren. **Kapitel 4** gibt einen Überblick über die Ökosystemleistungen, die Bäume in der Stadt bereitstellen können. Grundlage ist eine Analyse der einschlägigen Fachliteratur. Der verwendete Modellansatz zur Ermittlung der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen in bayerischen Städten wird in **Kapitel 5** kurz vorgestellt, bevor im folgenden Abschnitt die Ergebnisse zu den Ökosystemleistungen der verschiedenen Baumarten dargestellt werden. Dieses **Kapitel 6** ist der Hauptteil des Leitfadens. Aus Grafiken können für jede einzelne Baumart die Ökosystemleistungen je nach Alter und Versiegelungsgrad abgelesen werden. Eine Anleitung für die Nutzung der Daten wird anhand von Beispielen im **Kapitel 7** gegeben.

Bildquelle: Thomas Rötzer – Alte Pinakothek München

Das Stadtklima
heute und in naher Zukunft

Das Stadtklima heute und in naher Zukunft

Die globale Urbanisierung der vergangenen Jahrzehnte hat zu einem starken Bevölkerungsanstieg in den Städten geführt. Bis 2030 wird die Stadtbevölkerung weltweit mehr als 60 % der Gesamtbevölkerung ausmachen und bis 2050 auf fast 7 Milliarden ansteigen (UN, 2018). Auch in Deutschland und insbesondere in Bayern wachsen die Städte stetig. Die Bevölkerung der Großstädte Deutschlands wird bis 2035 zum Teil über 10 % gegenüber 2015 anwachsen. So wird die Einwohnerzahl für München im Jahr 2035 auf 1,66 Mio. prognostiziert, was einen Anstieg gegenüber 2015 von 14,4 % entspricht (Statista, 2018).

Die klimatischen Verhältnisse in Städten weichen von denen der Umgebung meist deutlich ab (Kuttler, 2004). Sie sind vor allem durch im Durchschnitt erhöhte Lufttemperaturen, eine geringere relative Luftfeuchtigkeit, zumeist verringerte Windgeschwindigkeiten, aber auch durch größere Luftturbulenzen gekennzeichnet. Hinzu kommen erhöhte Schadstoffbelastungen der Luft.

Die höheren innerstädtischen Lufttemperaturen gegenüber dem Umland werden als städtischer Wärmeinseleffekt bezeichnet (Oke, 1982). Während die Jahresdurchschnittstemperatur je nach Größe der Stadt um bis zu 2 °C über der des Umlands liegen kann, können an einzelnen Tagen sogar Unterschiede von 10 °C und mehr auftreten (Kuttler, 2004; Abb. 2). Die Lufttemperaturunterschiede sind nachts besonders ausgeprägt, weil die in Gebäuden und bebauten Oberflächen tagsüber gespeicherte Wärme wieder an die Umgebung abgegeben wird. Ursache für den Wärmeinseleffekt ist im Wesentlichen das Ersetzen von Vegetation oder Gewässern durch Bebauung und asphaltierte oder gepflasterte Straßen und Plätze. Während durch erstere ein Großteil der eingestrahlten Sonnenenergie reflektiert oder für die Verdunstung „verbraucht“ wird, absorbieren letztere die Sonnenenergie und wandeln sie in Wärme um. Durch Bebauung wird oftmals die Durchlüftung der Stadt verringert und damit das Eindringen von kühlerer Luft in die Stadt behindert. Luftschneisen leiten dagegen kühle Luft aus dem Umland in die Stadt und mindern so die Überwärmung.

Da Städte nicht einheitlich bebaut sind, sondern ein vielfältiges Mosaik unterschiedlich dicht bebauter, mit Straßen und Grünflächen durchsetzter Stadtquartiere darstellen, variieren auch die Lufttemperaturen und weitere klimatische Merkmale kleinräumig in hohem Maße. Stark besonnte und versiegelte Flächen, über denen die Luft sich aufwärmen kann, wechseln sich mit beschatteten, kühleren Bereichen ab. Und in der Nähe von windstillen Orten können Bereiche liegen, an denen sich der Wind durch Düsenwirkungen enorm verstärkt. Auch wenn in Städten das Klima gegenüber dem Umland verändert ist, bleiben regionalklimatische Unterschiede erhalten. Städte wie Bayreuth, Hof, Kempten, München, Nürnberg und Würzburg unterscheiden sich deutlich bezüglich der Sonnenscheindauer, Lufttemperaturen und Windverhältnisse. Hinzu kommen regionale Phänomene wie der Föhn oder ein großräumiger Luftaustausch. Ein Beispiel hierfür ist der nächtliche Luftaustausch in München durch den Zufluss kühler Luft aus den Alpen in die Stadt.

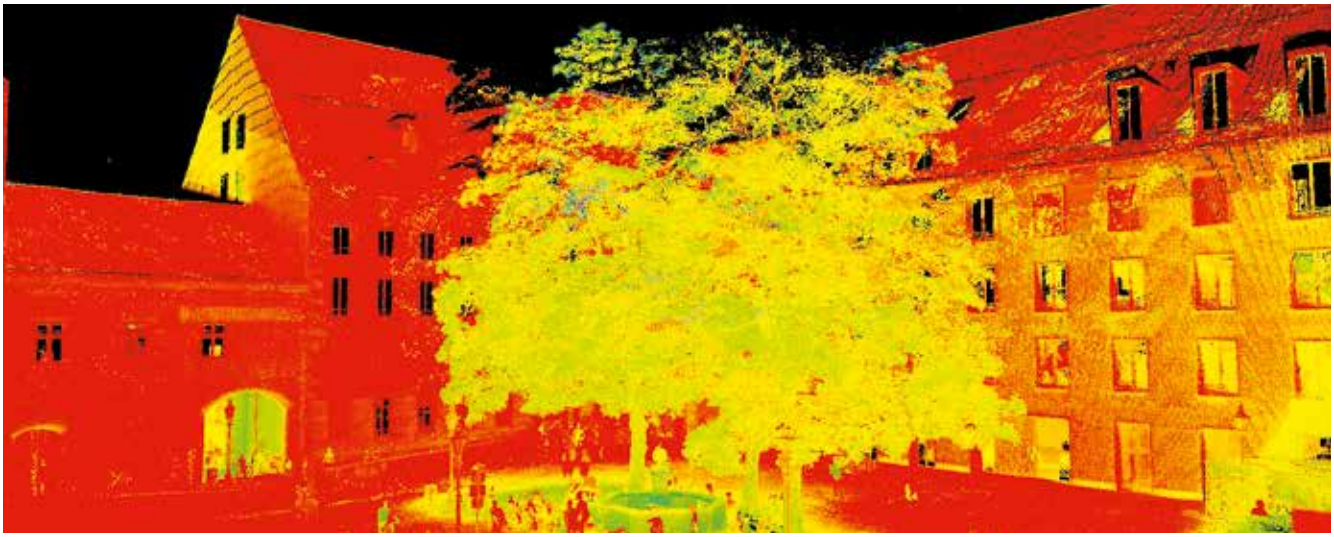


Abbildung 2: Wärmebild des Alten Hofs in München. Die Gebäude zeichnen sich durch starke Hitzebelastung aus, während die Bäume kühle Inseln sind (Quelle: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde).

Durch den globalen Klimawandel ändern sich die klimatischen Verhältnisse auch in den Städten zunehmend. So werden die Temperaturen bedingt durch den Klimawandel in den bayerischen Städten weiter steigen. Und wenn die gegenwärtig zu beobachtende Entwicklung einer immer stärkeren baulichen „Verdichtung“ der Städte und der damit verbundenen höheren Flächenversiegelung fortschreitet, werden sich die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Land sogar noch verstärken. In den Innenstädten wird es dann also besonders heiß werden (StMUV, 2021).

Es ist auch davon auszugehen, dass sich die Niederschlagsverhältnisse durch den Klimawandel verändern. Laut dem Klimaszenario A1B des regionalen Klimamodells REMO (das in neueren Simulationen dem Szenario RCP 8.5 entspricht) wird es im Sommerhalbjahr trockener werden, während es im Winter tendenziell mehr regnen und schneien wird (Jacob et al., 2008). Die Temperaturen werden bezogen auf das Szenario A1B bis zum Jahr 2100 in Bayern um etwa 5 °C ansteigen. Diese klimawandelbedingten Änderungen können jedoch regional, also auch von Stadt zu Stadt, unterschiedlich sein. Das Klimawandelszenario A1B basiert auf dem WettReg-Klimamodell und bildet die Grundlage der vorliegenden Simulationen zum Wachstum und den Umweltleistungen für die nahe Zukunft. Dieses Szenario prognostiziert einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur in sechs ausgewählten bayerischen Städten bis Ende 2050 zwischen 0,6 °C und 1,1 °C (Spekat et al., 2007). In Städten wie Würzburg, die sich bereits heute durch ein trocken-warmes Klima auszeichnen, können solche Temperaturanstiege in Kombination mit trockenen Sommern drastische Folgen haben, wie erheblichen Wassermangel für das urbane Grün oder steigender Hitzestress für die Menschen.

Das Stadtklima und der Klimawandel beeinflussen das Leben der Menschen und deren Umwelt wesentlich. Einerseits bedeuten erhöhte Temperaturen im Winter, dass weniger geheizt werden muss und es auch angenehmer ist, sich im Freien aufzuhalten. Auch im Sommerhalbjahr können aufgrund höherer Temperaturen Freiräume im Jahres- und Tagesverlauf länger genutzt werden. Andererseits steigt jedoch das Risiko von gesundheitlichen Belastungen durch extreme Hitzeereignisse im Sommer, erhöhte Ozonkonzentrationen und Feinstaubbelastungen (Moser et al., 2018; UN, 2018).

Es besteht ein klarer Zusammenhang zwischen der Übersterblichkeitsrate und Hitzewellen. Im Sommer 2003, in dem wiederholte Hitzewellen auftraten, starben nach Auswertung von Statistiken über 70.000 Menschen mehr als gewöhnlich in Europa (Robine et al., 2008). Durch den Klimawandel ist zu erwarten, dass sich diese Hitzeereignisse weiter verstärken werden, mit entsprechend negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Besonders betroffen werden hiervon ältere Bürger, Kleinkinder und Personen mit gesundheitlichen Vorbelastungen wie Herz-Kreislauferkrankungen, sein (siehe www.vkg.bayern.de). Hinzu kommt die Gefahr weiterer Gesundheitsbelastungen, beispielsweise durch verlängerte Blühzeiten von Pflanzenarten, die allergisch wirkende Pollen verbreiten.

Umso wichtiger wird es daher, durch die vorausschauende Entwicklung von gut begrünten Freiräumen den städtischen Wärmeinseleffekt abzuschwächen und an Hitzetagen kühle Oasen für Mensch und Tier bereitzustellen. Mit dem „Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern“ (ZSK, 2018) des ZSK wurden bereits Handlungsempfehlungen für Klimaschutz und Klimawandelanpassung durch die sogenannte Grüne Infrastruktur gegeben (zu finden auf: www.zsk.tum.de). Der Leitfaden zeigt detailliert, wie durch die Begrünung von Stadtquartieren mit Bäumen sowie durch Fassaden- und Dachbegrünungen die negativen Folgen des Klimawandels weitgehend ausgeglichen werden können und angenehme Aufenthaltsbedingungen in den Frei- und Grünflächen geschaffen werden können. Zugleich wird einer gesunden und vielfältigen Stadtnatur mehr Platz in einer klimaresilienten zukunftsfähigen Stadt gegeben. Die Erhöhung des Grünanteils einer Stadt (vor allem durch Stadtbäume) hat sich dabei als besonders effektive Anpassungsmaßnahme herausgestellt (ZSK, 2018).

Bildquelle: Thomas Rötzer – Stadt München

Stadtklima
und Baumwachstum

Stadtklima und Baumwachstum

Die Stadt und das städtische Umland sind sehr heterogene Räume, die vielfältige Lebensbereiche für Flora, Fauna und Mensch zur Verfügung stellen. So sind der Versiegelungsgrad, der Anteil an Bebauung, der Wärme- und Strahlungshaushalt sowie der Anteil von Wiesenflächen und grünen Infrastrukturen an städtischen Plätzen und Parks 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 (Abb. 3).

Im Vergleich zu Waldbäumen und Bäumen in großen Parkanlagen leiden Bäume an extremen Standorten wie Straßen und 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 aufgrund von Straßenverkehr stark verdichtet. Anthropogene 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).

Neuere Studien zeigen aber auch, dass sich das Wachstum von Stadtbäume im Laufe des letzten Jahrhunderts verändert hat (Pretzsch et al., 2017, Moser-Reischl et al., 2019). In einer weltweiten Studie zeigen Pretzsch et al. (2017) auf, dass Stadtbäume schneller wachsen und somit schneller altern als Bäume in Vororten oder Wäldern. Als Gründe werden vornehmlich eine verlängerte Vegetationsperiode, höhere Temperaturen in der Stadt im Vergleich zum Umland, höhere Stickstoffeinträge und eine erhöhte CO_2-Konzentration genannt. Dieses schnellere Wachstum und auch Altern machen jedoch ein häufigeres Ersetzten der gepflanzten Bäume notwendig, was zu erhöhten Kosten für das Grünmanagement führt.

Laut der GALK-Straßenbaumliste gibt es im deutschen Straßenraum 171 Straßenbaumarten (GALK e. V., 2018). In Deutschland und Mitteleuropa werden Stadtbaumbestände jedoch hauptsächlich von den Arten der Gattungen Linde (z. B. Winterlinde *Tilia cordata,* Sommerlinde *T. platyphyllos,* Silberlinde *T. tomentosa*) und Ahorn (z. B. Spitzahorn *Acer platanoides*, Bergahorn *A. pseudoplatanus)* dominiert. Weitere häufige Gattungen sind Eichen *(Quercus),* Rosskastanien *(Aesculus),* Birken *(Betulus),* Hainbuchen *(Carpinus),* Eschen *(Fraxinus),* Ulmen *(Ulmus),* Pappeln *(Populus),* Baum-Haseln *(Corylus),* Schnurbäume *(Styphnolobium),* Mehlbeeren *(Sorbus),* Platanen *(Platanus)* und Scheinakazien *(Robinia)* (Abb. 4).

Abbildung 3: Stadtbäume an einem Parkstandort in München (Spenglerplatz) und an einem hoch versiegelten Standort in München (Fotos: Thomas Rötzer, Tiffany Ellner)

Abbildung 4: Häufige Stadtbaumarten: Linde *Tilia cordata* in München, Scheinakazie *Robinia pseudoacacia* in Würzburg, Rosskastanie *Aesculus hippocastanum* in München, Platane *Plantanus x acerifolia* in Würzburg (Fotos: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Pixabay).

Das Wachstum und die erbrachten Umweltleistungen der grünen Infrastruktur – insbesondere von Stadtbäumen – und das spezifische Stadtklima stehen in unmittelbaren Zusammenhang. Neben dem übergeordneten Stadtklima haben auch die klimatischen Verhältnisse an einem Standort einen starken Einfluss auf das Wachstum von Stadtbäumen.

Häufig vorkommende Straßenbaumarten wie z. B. die Rosskastanie leiden vermehrt unter Trockenstress und Vitalitätseinbußen (Tubby & Webber, 2010). Dies ist mit veränderten Umweltbedingungen (verstärkter städtischer Wärmeinseleffekt, Klimawandel) und den oft ungünstigen Wachstumsbedingungen in der Stadt (eingeschränkte Wasserverfügbarkeit, starke Hitze) zu begründen. Schädigungen der Krone und des Stammes, früher Blattverlust, Sonnenbrand und Wachstumsminderungen sind die Folge. Neben dem gesteigerten Stress nimmt klimabedingt auch die Belastung durch Schädlinge und Krankheiten zu, der weltweite Handel fördert zudem das Auftreten von neuen Schadorganismen.

Um vor allem den Einfluss des Klimas auf das Wachstum der Baumarten zu beschreiben, haben Roloff et al. (2008) eine „Klima-Arten-Matrix“ entwickelt, die die Baumarten entsprechend ihrer Trockenstresstoleranz und der Winterhärte in die Kategorien „sehr gut geeignet“, „gut geeignet“, „geeignet aber z. T. problematisch“, „nur sehr eingeschränkt geeignet“ und „ungeeignet“ einteilt. Von den im Leitfaden behandelten vier Arten wurde die Scheinakazie in den Kategorien Trockentoleranz und Winterhärte als besonders geeignet eingestuft (Tab. 1). Die Platane ist aufgrund ihrer etwas geringeren Winterhärte als geeignet bewertet worden. Die Winterlinde hat eine etwas geringere Trockentoleranz und wurde ebenfalls als geeignet bewertet, während die Rosskastanie als weniger geeignet eingestuft wurde, da diese Art sowohl eine eingeschränkte Trockentoleranz als auch eine etwas geringere Winterhärte aufweist (Roloff et al., 2008). Dies spiegelt sich auch im Wasserbedarf der Arten wider: Hier hat die Scheinakazie den geringsten Bedarf, während die Rosskastanie den höchsten aufweist und Platane sowie Winterlinde im Mittelfeld liegen (Tab. 1).

Nach Roloff et al., (2008) sind viele Sorten von Baumarten aus anderen Klimaregionen der Erde oftmals geeigneter für das städtische Klima als heimische, derzeit häufig verwendete Stadtbaumarten. Dies untersucht auch das Projekt „Stadtgrün 2021“ der Landesanstalt für Wein- und Gartenbau Veitshöchheim, welches neu eingeführte Baumarten aus unterschiedlichen Herkunftsgebieten (Südosteuropa, Nordamerika, Asien) auf ihre Hitze- und Winterhärte in drei Städten Bayerns testet. Erste Ergebnisse zeigen, dass jeder einzelne Standort innerhalb einer Stadt spezifisch im Hinblick auf das Baumwachstum betrachtet werden muss (Böll, 2018).

Einteilung von Baumarten nach der Trockentoleranz

Baumart (wissenschaftliche Bezeichnung)	allgemeiner Name	Trockentoleranz	Wasserbedarf
Populus tremula	Zitter-Pappel	1	1
Robinia pseudoacacia	Scheinakazie	1	1
Pinus nigra	Schwarzkiefer	1	1,5
Sophora japonica	Japanischer Schnurbaum	1	2
Ginkgo biloba	Ginkgo	1	2,5
Gleditsia triacanthos	Amerikanische Gleditsche	1	2,5
Platanus x acerifolia	Platane	1	2,5
Prunus avium	Vogel-Kirsche	1	2,5
Acer platanoides	Spitzahorn	2	2
Betula pendula	Hänge-Birke	2	2
Castanea sativa	Ess-Kastanie	2	2
Corylus colurna	Baum-Hasel	2	2
Liquidambar styraciflua	Amerikanischer Amberbaum	2	2
Pyrus communis	Kultur-Birne/Birnbaum	2	2
Sorbus intermedia	Schwedische Mehlbeere	2	2
Tilia cordata	Winterlinde	2	2
Fraxinus excelsior	Gemeine Esche	2	2,5
Carpinus betulus	Hainbuche	2	3
Quercus robur	Stieleiche	2	3
Quercus rubra	Rot-Eiche	2	3
Salix alba	Silber-Weide	3	2,5
Aesculus hippocastanum	Rosskastanie	3	3
Fagus sylvatica	Rot-Buche	3	3
Juglans regia	Echte Walnuss	3	3
Tilia platyphyllos	Sommerlinde	3	3
Ulmus glabra	Berg-Ulme	4	2,5
Ulmus hollandica	Holländische Ulme	4	2,5
Alnus glutinosa	Schwarz-Erle	4	3
Acer pseudoplatanus	Berg-Ahorn	4	4

Tabelle 1: Einteilung von Baumarten nach der Trockentoleranz (1 = sehr hoch bis 4 = sehr gering) und dem Wasserbedarf (1 = sehr gering bis 4 = sehr hoch) nach Roloff (2013).
Dunkel markiert sind die untersuchten Baumarten.

Für die Stadtplanung fehlen bisher jedoch Ansätze zur Quantifizierung des Wachstums und der Umweltleistungen von Stadtbaumbeständen, die auf einer genauen Datengrundlage aus Messungen beruhen. Insbesondere über die Dimensionsveränderung von Stadtbäumen mit zunehmendem Alter sowie über die Beschattung, Abkühlungsleistung und Kohlenstoffbindung verschiedener Stadtbaumarten ist wenig bekannt. In der Praxis wird in der Regel auf Erfahrungswerte zurückgegriffen. Solche Erfahrungswerte sind jedoch schon unter heutigen Klimabedingungen fraglich und unter sich verändernden Klimabedingungen mit noch größeren Unsicherheiten behaftet.

Bildquelle: Stephan Pauleit – Englischer Garten München

Ökosystem-leistungen
von Bäumen

Ökosystemleistungen von Bäumen

4.1 Überblick

Urbanes Grün ist ein wichtiger Bestandteil des Stadtbildes. Neben ästhetischen Funktionen erbringen insbesondere Stadtbäume vielfältige Leistungen, etwa für das lokale Klima, die urbane Klimaanpassung, die Regulierung des Wasserhaushalts und die Kohlenstoffspeicherung. Diese als Ökosystemleistungen bezeichneten direkten oder indirekten Beiträge zum menschlichen Wohlergehen lassen sich in vier Kategorien unterteilen: umweltregulierende Leistungen, Bereitstellung von Ressourcen, kulturelle und unterstützende Leistungen (TEEB DE, 2016). Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Ökosystemleistungen von Pflanzen in diesen vier Kategorien.

Unterstützend	Primärproduktion
	Nährstoffkreislauf
	Biodiversität
Bereitstellend	Nahrung
	Holz und Biomasse
	Wasser
	Medizinische Ressourcen
Regulierend	Kohlenstoffbindung
	Abkühlung durch Evapotranspiration
	Abkühlung durch Beschattung
	Verbesserung der Luftqualität
	Retentionswirkung
	Lärmminderung
	Windminderung
Kulturell	Erholung
	Ästhetik
	Bildung
	Spiritualität

Tabelle 2: Ökosystemdienstleistungen von Stadtgrün

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. Bäume spielen dabei aufgrund ihres großen Volumens eine besondere Rolle. Bisher ist wenig über die räumliche und zeitliche Dynamik von Stadtbäumen in Städten bekannt. Bestenfalls bestehen Informationen zu Bäumen im öffentlichen Raum, insbesondere zum Straßenbaumbestand, falls entsprechende Katasterwerke angelegt und regelmäßig aktualisiert worden sind. Die Erfassung und Modellierung der Wachstumsdynamik und somit auch der möglichen Ökosystemleistungen von Stadtbäumen sind daher wichtige Schritte hin zur quantitativen Erfassung des gesamten Grüns einer Stadt und stellen eine bedeutende Informationsgrundlage für die Klimaanpassung der Städte dar.

Die Planung von Grünflächensystemen, die vielfältige Ökosystemleistungen erbringen, erfordert umfassende und wissenschaftlich abgesicherte Informationen zu städtischen Grünstrukturen. 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, die auf dem neu entwickelten prozessorientierten Wachstumsmodell CityTree (Rötzer et al., 2019) basieren, stellen dafür ein praxisnahes Hilfsmittel dar.

4.2 Relevanz

Im europäischen Raum und im Hinblick auf Veränderungen des Stadtklimas durch den Klimawandel sind insbesondere die klimaspezifischen regulierenden Leistungen wichtige Funktionen von Stadtbäumen. Darunter fallen Kühlung durch Beschattung und Verdunstung, Verbesserung der Luftqualität, Feinstaubfilterung, Hochwasserschutz sowie Lärm- und Windminderung. Im Fokus von Öffentlichkeit und Forschung ist derzeit insbesondere die Abkühlungswirkung von urbanem Grün. Bäume kühlen ihren Kronenraum durch Transpiration und spenden Schatten (Abb. 5), welcher die Temperatur der umliegenden Oberflächen senkt. Die Speicherung von CO_2 ist ebenfalls eine wichtige Ökosystemleistung, auch wenn Stadtbäume im Vergleich zu Forstbäumen nur einen kleinen Teil der weltweiten Baumbestände ausmachen. Weitere Ökosystemleistungen, welche die Bereitstellung von Nahrung, Holz und Biomasse, Wasser und medizinischen Ressourcen betreffen, sind zum Beispiel Initiativen zur Anlage von gemeinschaftlich genutzten Obstwäldern und das aus den USA stammende „Urban Foraging“, also das Sammeln von wildwachsenden, essbaren Pflanzen und Früchten in der Stadt. Zu nennen sind hier auch Initiativen wie die Wanderbaumallee von GreenCity e.V. (siehe www.greencity.de). Weiterführende Informationen zu Ökosystemleistungen von Stadtgrün sind z. B. in Rahman et al. (2017) oder Moser et al. (2018) zu finden.

Abbildung 5:
Fisheye-Foto eines Stadtbaumes in Würzburg mit umliegender Bebauung zur Bestimmung des Blattflächenindex und des Lichteinfalls am Baumstandort (Quelle: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde)

Bildquelle: Thomas Rötzer – München

Modellierungs-hintergrund

Modellierungshintergrund

5.1 Beschreibung des Wachstumsmodells CityTree

Die Wachstumsmodellierung von Stadtbäumen ist im Vergleich zur Modellierung von Waldbeständen (Rötzer et al., 2017; Watt & Kirschbaum, 2011) noch ein recht junger Forschungszweig. So gibt es speziell zu Stadtbäumen nur wenige Studien, die meist auf die rein allometrischen Wachstumsbeziehungen abzielen, wie z. B. Peper et al. (2014) oder Moser et al. (2015). Angaben zu Ökosystemleistungen von Stadtbäumen beruhen vielfach auf groben Schätzungen. Die Basis des neu entwickelten Wachstumsmodells für Stadtbäume CityTree bilden Messungen von über 2.000 Stadtbäumen in sechs bayerischen Städten.

Das Modell simuliert *aktuell* das Wachstum und die Ökosystemleistungen der Baumarten Winterlinde, Scheinakazie, Platane und Rosskastanie in Abhängigkeit von Klima und Umweltbedingungen. Weitere Baumarten werden derzeit parametrisiert. Eingangsparameter sind das Alter, der Stammdurchmesser und die Baumhöhe. Als Triebkräfte des Wachstums werden neben der CO_2-Konzentration der Atmosphäre monatliche Werte der Strahlung, der Temperatur, der relativen Luftfeuchte, der Windgeschwindigkeit und des Niederschlags benötigt. Der Boden wird über die Feldkapazität, den permanenten Welkepunkt und die Durchwurzelungstiefe beschrieben.

CityTree ist modular aufgebaut (Abb. 6). In den Modulen Klima und Pflanzenentwicklung wird deren jeweiliger Jahresverlauf simuliert. Auf dieser Basis kann in weiteren Modulen die gesamte Wasserbilanz eines Baumes sowie die Photosynthese- und Respirationsleistung in monatlichen Schritten berechnet werden. Neben dem Wachstum und der Produktivität eines Baumes lassen sich auch die Kohlenstoffspeicherung, die Beschattung und die Kühlungswirkung eines Baumes standortspezifisch abschätzen.

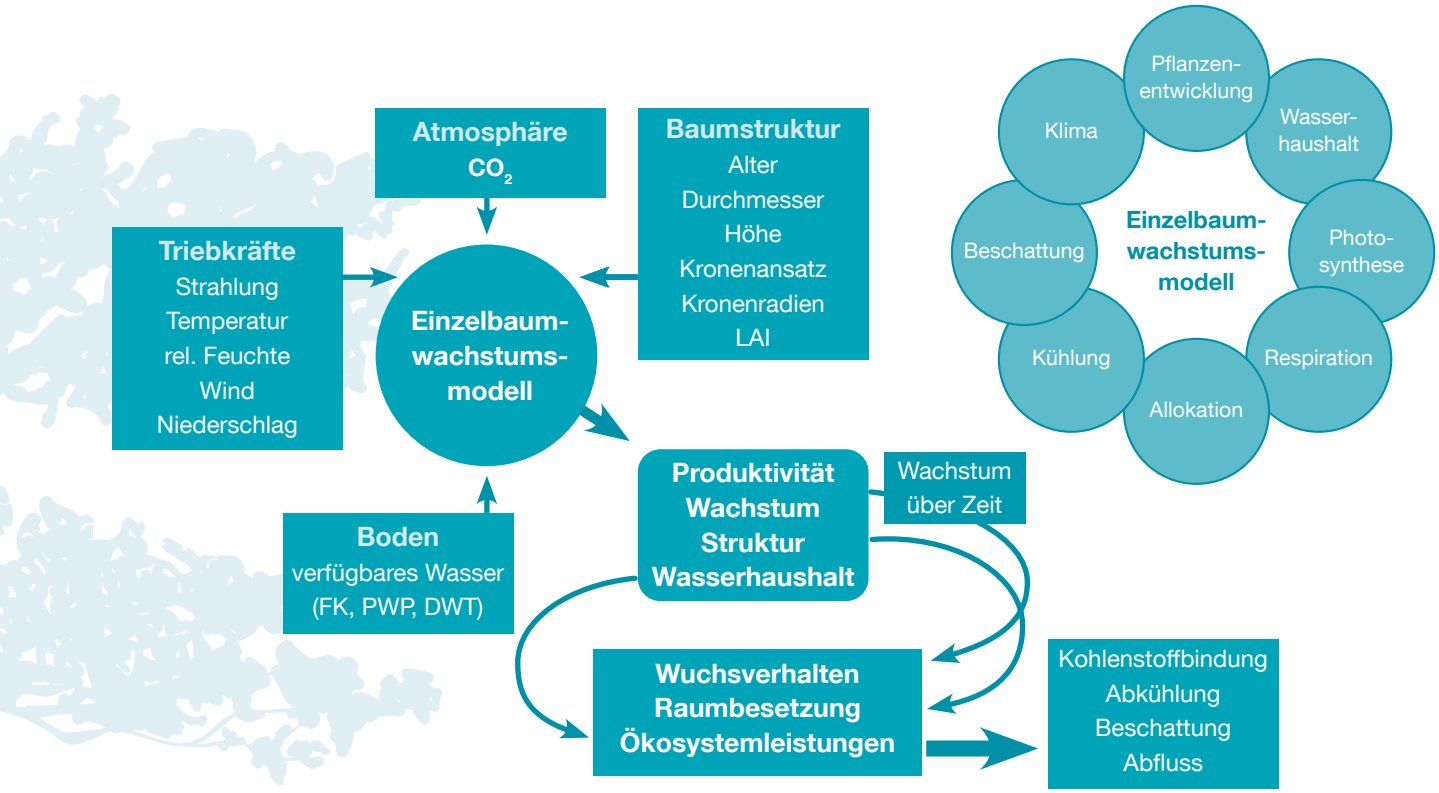


Abbildung 6: Schema und modulare Zusammensetzung des Wachstumsmodells CityTree

In Abhängigkeit vom Klima und den Bodenbedingungen sowie den Umgebungsbedingungen können so das Wuchsverhalten und die Raumbesetzung von Einzelbäumen unterschiedlichen Alters bestimmt werden. Zudem können auch Ökosystemleistungen wie Kohlenstoffbindung, Wasserverbrauch, Abfluss, Beschattung und Abkühlung durch Verdunstung simuliert werden; dies sowohl für einzelne innerstädtische Standorte als auch für das klimatische Jahresmittel einer Stadt, für Klimaextreme wie trockene Jahre oder auch unter Berücksichtigung veränderter Klimabedingungen. Eine detaillierte Beschreibung des Modells ist in der Studie von Rötzer et al. (2019) zum ZSK-Projekt „CityTrees“ (siehe www.zsk.tum.de) zu finden.

5.2 Auswahl der Baumarten

Mit den Baumarten Winterlinde, Scheinakazie, Platane und Rosskastanie wurden Baumarten ausgewählt, die häufig in mitteleuropäischen Städten gepflanzt werden. Gleichzeitig wird mit den vier untersuchten Baumarten eine breite ökologische Spanne der Arten im Hinblick auf den Licht- und Wasserbedarf und die Trockentoleranz abgedeckt (Tab. 3). Bei der in Tabelle 3 angegebenen Reaktion auf Wassermangel wird zwischen anisohydrischen und isohydrischen Verhalten unterschieden. Mit isohydrischem Verhalten wird ein unmittelbares Schließen der Spaltöffnungen (Stomata) der Blätter als Reaktion auf Trockenheit beschrieben. Dieses Verhalten minimiert den Wasserverbrauch durch Verdunstung. Durch die geschlossenen Spaltöffnungen wird jedoch auch die Photosyntheseleistung durch eine verringerte CO_2-Konzentration im Blattinneren und somit auch das Wachstum reduziert. Bei einer anisohydrischen Reaktion auf Trockenheit versucht die Pflanze, die Spaltöffnungen der Blätter so lange wie möglich offen zu halten, um dadurch den Gasaustausch und die Photosyntheseleistung möglichst lange aufrecht zu erhalten. Dadurch bleibt der Wasserverbrauch durch Transpiration auf einem hohen Niveau, was aber bei lang anhaltender Trockenheit zu Schädigungen des Baumes führen kann.

		Baumart			
Kennwerte		**Winterlinde** *(Tilia cordata)*	**Scheinakazie** *(Robinia pseudoacacia)*	**Platane** *(Platanus x acerifolia)*	**Rosskastanie** *(Aesculus hippocastanum)*
Herkunft		heimisch	Nordamerika	Kreuzung, Mittelmeerraum	Mazedonien, ab dem 16. Jh. in Wien bzw. in Bayern eingeführt
Phänologie	Austrieb	mittel (JT 125)	spät (JT 135)	mittel (JT 123)	früh (JT 114)
	Blattfall	mittel (JT 280)	mittel (JT 280)	mittel (JT 280)	früh (JT 276)
Lichtanspruch		Schattenbaumart	Lichtbaumart	Lichtbaumart	Halbschattenbaumart
Schattentoleranz *		4,2	1,7	3	3,4
Trockentoleranz **/*		mittel (2) / 2,8	hoch (1) / 4,1	hoch (1) / 3,4	gering (3) / 2,8
Wasserbedarf **		gering (2)	sehr gering (1)	mittel (2,5)	mittel (2,5)
Staunässetoleranz *		1,8	1,1	2,6	1,4
Reaktion gegenüber Wassermangel		anisohydrisch	isohydrisch	isohydrisch	anisohydrisch
Wurzeltyp		Tiefwurzler mit Herzwurzel	Flachwurzler mit Senkerwurzeln	Flachwurzler mit Herzwurzel	Flachwurzler

Tabelle 3: Charakteristika der vier Stadtbaumarten * nach Niinemets and Valladares (2006): 1 = niedrig … 5 = hoch ** nach Roloff (2013), JT = Jahrestag

Winterlinde *(Tilia cordata)* München, Baldurstraße

Platane *(Platanus x acerifolia)* Speyer, Gilgenstraße

Scheinakazie *(Robinia pseudoacacia)* München, Viktualienmarkt

Rosskastanie *(Aesculus hippocastanum)* München, Eversbuschstraße

(Fotos: T. Rötzer)

Bildquelle: Werner Lang – München

Wachstum, Struktur und Ökosystemleistungen einzelner Baumarten in bayerischen Städten

Wachstum, Struktur und Ökosystemleistungen einzelner Baumarten in bayerischen Städten

Die Simulationen und Analysen wurden für vier Baumarten in sechs Städten sowie für das ein über die sechs Städte gemitteltes Klima durchgeführt. Neben dem Wachstum und der Dimensionsänderung der Bäume wurden die Ökosystemleistungen Kohlenstoffspeicherung, Transpiration, Kühlung durch Verdunstung und Beschattung berechnet. Die Simulationen stellen jährliche Mittelwerte und Summen für das gegebene Klima (1965–2015) sowie für die Klimabedingungen der nahen Zukunft (2026–2050) für Bäume unterschiedlicher Altersklassen dar.

Die sechs Städte weisen dabei deutlich unterschiedliche klimatische Standortbedingungen auf. In Tabelle 4 und Abbildung 7 sind die geografische Lage und die klimatischen Mittelwerte der Untersuchungsstandorte zusammengefasst.

Stadt	Einwohnerzahl	Größe [km²]	Breite [°]	Länge [°]	Höhe [m]	Temp. [°C]	Nie. [mm]
Bayreuth	73.065	66,9	49,95	11,57	340	8,4	728
Hof	45.183	58	50,31	11,91	500	7,5	716
Kempten	67.529	63,3	47,73	10,32	674	7,4	1257
München	1.464.301	310,7	48,14	11,58	519	9,6	960
Nürnberg	511.628	186,4	49,45	11,08	309	9,2	634
Würzburg	126.010	87,6	49,79	9,95	177	9,6	599

Tabelle 4: Geografie und Klima der untersuchten bayerischen Städte (Temp.: Temperatur, Nie.: Niederschlag). Die klimatischen Werte beziehen sich auf den Zeitraum 1965–2015 (DWD - CDC, 2018). Die Daten basieren auf Messwerten an den jeweiligen DWD-Klimastationen und bilden nicht unbedingt die Mittelwerte des Stadtzentrums ab.

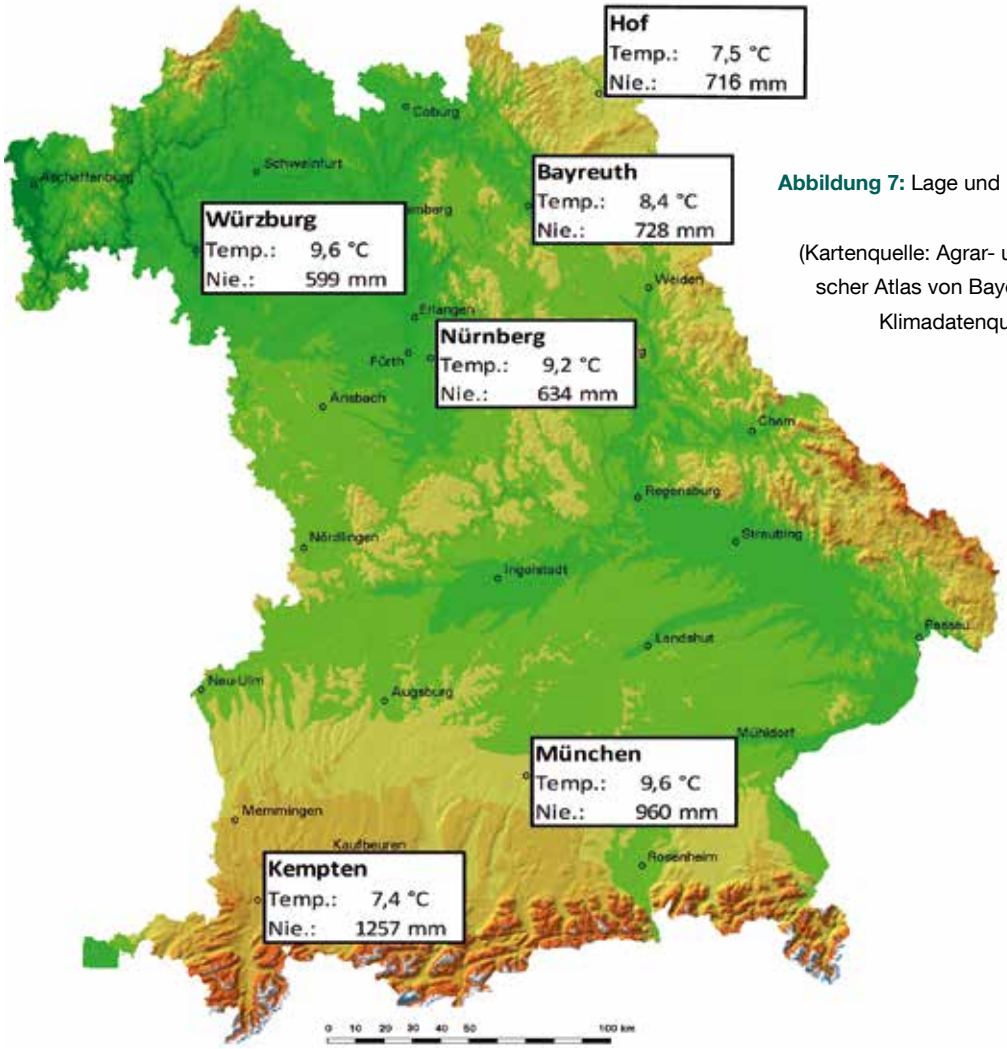


Abbildung 7: Lage und Klima der untersuchten bayerischen Städte (Kartenquelle: Agrar- und Umweltklimatologischer Atlas von Bayern, Rötzer et al., 1997; Klimadatenquelle: DWD CDC, 2018).

Die verwendeten standortspezifischen Klimaszenarien für die nahe Zukunft (A1B, 2026–2050) basieren auf dem statistischen Klimamodell WETTREG nach Spekat et al. (2007) und wurden standortspezifisch für jede Stadt berechnet. Tabelle 5 zeigt die Jahresmittel der der Temperatur bzw. Jahressummen des Niederschlags der sechs bayerischen Städte für das Szenario A1B der nahen Zukunft sowie die die Klimabedingungen der nahen Zukunft (2026–2050) für Bäume unterschiedlicher Altersklassen dar. Die sechs Städte weisen deutlich unterschiedliche klimatische Standortbedingungen auf. In Tabelle 4 und Abbildung 7 sind die geografische Lage und die klimatischen Mittelwerte der Untersuchungsstandorte zusammengefasst.

	Temperatur		Niederschlag [mm]	
Stadt	**Mittelwert**	**Veränderung**	**Mittelwert**	**Veränderung**
Bayreuth	9,1	+0,7	759	+31
Hof	8,4	+0,9	776	+60
Kempten	8,5	+1,1	1356	+99
München	10,2	+0,6	959	-1
Nürnberg	10,3	+1,1	645	+11
Würzburg	10,3	+0,7	590	-9

Tabelle 5: Mittlere jährliche Temperaturen und Niederschlagssummen der sechs bayerischen Städte für das Szenario A1B (Klimamodell WettReg) der nahen Zukunft (2026–2050) und Differenzen gegenüber dem aktuellen Klima (1965–2015)

Im Mittel der sechs Städte erhöht sich die Temperatur bis 2050 um 0,9 °C, die mittlere Jahressumme des Niederschlags jedoch lediglich um 32 mm, d. h. um 4 %. Jedoch verschiebt sich die Niederschlagsverteilung (Abb. 8): Während in den Sommermonaten (Mai–August) deutlich weniger Niederschläge fallen, steigen sie in den anderen Monaten z. T. deutlich an.

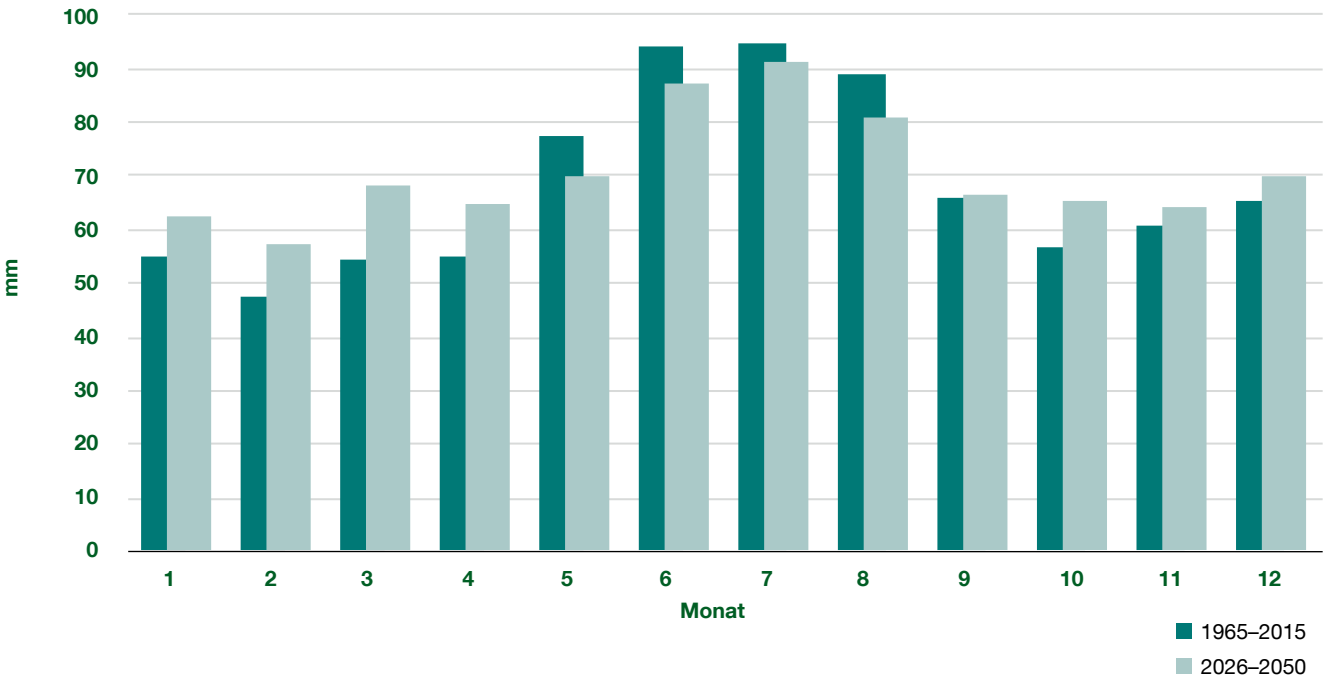


Abbildung 8: Mittlere monatliche Niederschlagssummen für das aktuelle Klima (1965-2015) und für die nahe Zukunft (2026-2050) des Szenario A1B im Mittel der sechs bayerischen Städte.

Für alle Simulationen wurde als Bodenart ein sandiger Lehm mit einer Feldkapazität von 25 Vol.-% und einem Welkepunkt von 8 Vol.-% bei einer maximalen Durchwurzelungstiefe von 100 cm angenommen, was einen pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt von 170 mm ergibt. Der Versiegelungsgrad beschreibt den Prozentwert der versiegelten Fläche, über die dem Baum kein Wasser zur Verfügung gestellt wird (das1,5-fache der Kronenprojektionsfläche wird als Grundfläche verwendet). Für jede Baumart wurden zehn Altersklassen gebildet. Die Mittelwerte des Brusthöhendurchmessers (BHD), der Baumhöhe, des Kronendurchmessers und der Kronenlänge einer Altersklasse ergeben die Initialwerte der Simulationen (Tab. 6).

Winterlinde *(Tilia cordata)*

Altersklasse [Jahre]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
BHD [cm]	7,2	14,5	22,2	30,3	38,5	47,0	55,6	64,4	73,3	82,3
Baumhöhe [m]	5,8	8,6	11,1	13,3	15,3	17,2	19,0	20,7	22,3	23,9
Kronenlänge [m]	3,8	6,0	8,1	10,0	11,9	13,7	15,5	17,2	18,9	20,6
Kronendurchmesser [m]	3,3	5,1	6,9	8,6	10,3	11,9	13,4	15,0	16,5	18,0

Scheinakazie *(Robinia pseudoacacia)*

Altersklasse [Jahre]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
BHD [cm]	11,0	21,1	31,1	41,2	51,2	61,3	71,3	81,4	91,4	101,5
Baumhöhe [m]	9,3	12,1	14,2	15,8	17,3	18,6	19,8	20,9	21,9	22,8
Kronenlänge [m]	6,1	8,4	10,2	11,8	13,1	14,4	15,5	16,6	17,6	18,6
Kronendurchmesser [m]	5,0	7,0	8,7	10,2	11,5	12,7	13,8	14,9	15,9	16,9

Platane *(Platanus x acerifolia)*

Altersklasse [Jahre]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
BHD [cm]	11,9	19,9	30,4	39,7	49,6	59,5	69,7	80,9	88,9	101,1
Baumhöhe [m]	8,6	11,2	14,4	17,2	19,5	21,6	22,5	22,2	26,0	29,0
Kronenlänge [m]	5,8	7,9	10,5	13,2	15,8	18,4	19,6	19,9	22,3	25,5
Kronendurchmesser [m]	4,3	7,3	10,4	12,3	14,3	15,7	18,0	19,1	20,0	20,4

Rosskastanie *(Aesculus hippocastanum)*

Altersklasse [Jahre]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
BHD [cm]	6,9	13,6	23,1	31,5	40,5	48,3	54,7	60,7	66,4	71,5
Baumhöhe [m]	4,7	6,9	9,0	11,2	12,5	13,9	15,4	16,6	17,9	18,8
Kronenlänge [m]	2,4	4,5	6,2	8,6	9,8	11,1	12,2	12,9	14,6	15,0
Kronendurchmesser [m]	2,0	4,4	6,2	7,8	9,0	9,8	10,5	11,2	11,6	12,3

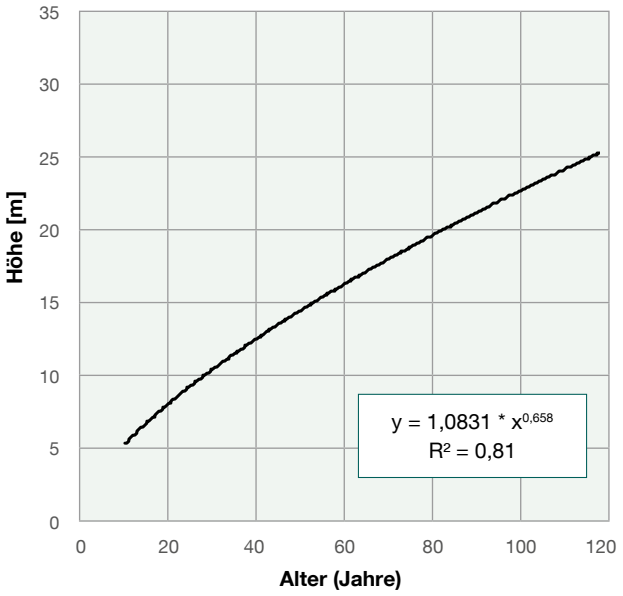
Tabelle 6: Kenngrößen der Bäume in zehn Altersklassen für die Baumarten Winterlinde *(T. cordata),* Scheinakazie (*R. pseudoacacia)*, Platane *(P. x acerifolia)* und Rosskastanie *(A. hippocastanum).* Angegeben ist das Mittel einer Altersklasse, d. h., dass z. B. in der Altersklasse 20 alle Bäume mit einem Alter zwischen 16 und 25 Jahren enthalten sind. Die Grundlage dieser Werte sind Messungen in den sechs bayerischen Städten.

6.1 Dimensionsveränderungen

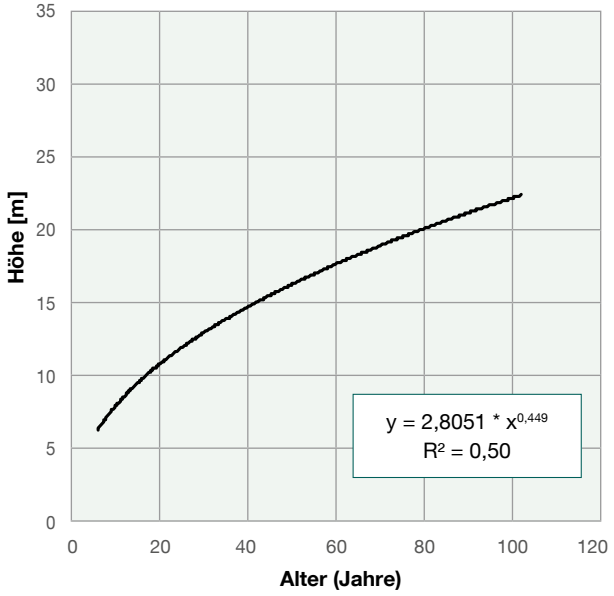
Baumhöhe, Kronenvolumen, Kronendurchmesser und Kronenprojektionsfläche sind vornehmlich von der Baumart und vom Alter abhängig. Einflüsse des Standorts beruhen zumeist auf einer Behinderung der Ausbreitung durch benachbarte Bauten oder anstehende Bäume. Die Abbildungen 9 bis 12 zeigen deswegen baumartenspezifische und altersabhängige Veränderungen der einzelnen Dimensionen.

Baumhöhe

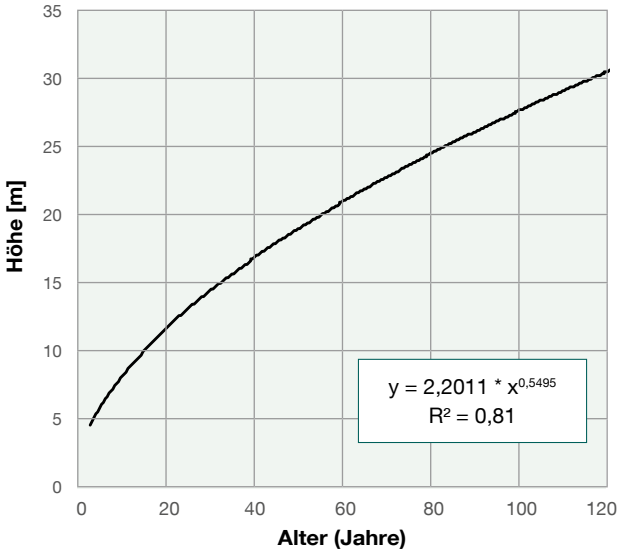
Winterlinde



Scheinakazie



Platane



Rosskastanie

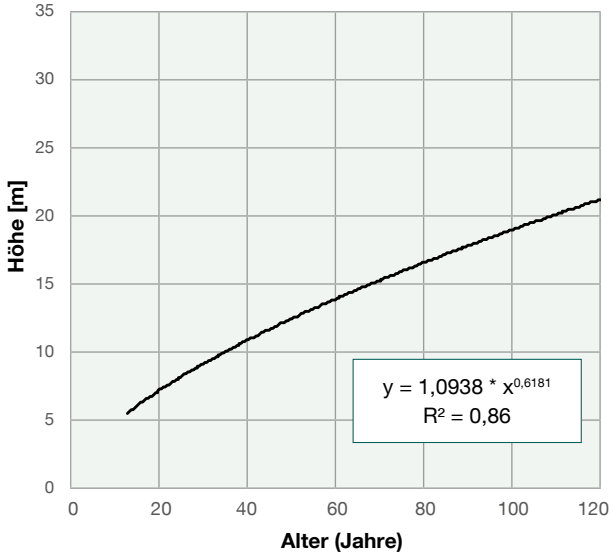


Abbildung 9: Baumhöhe in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß.

Bei allen Arten nimmt die Höhenentwicklung kontinuierlich mit dem Alter zu. Platanen werden am höchsten, Rosskastanien bleiben relativ klein. So erreichen 20-jährige Platanen durchschnittlich bereits eine Höhe von ca. 12 m, bei einem Alter von 80 Jahren sind sie durchschnittlich knapp 25 m hoch. Dagegen haben Rosskastanien mit 80 Jahren nur eine Höhe von ca. 16 m, während Winterlinden und Scheinakazien mit 80 Jahren eine Höhe von 19 bis 20 m erreichen.

Kronendurchmesser

Ein ähnliches Verhalten wie bei der Höhenentwicklung erkennt man beim Kronendurchmesser. Platanen zeigen ebenfalls das stärkste und Rosskastanien das geringste Wachstum. Während 20 Jahre alte Platanen einen Kronendurchmesser von knapp 7 m im Durchschnitt aufweisen, zeigen gleichaltrige Winterlinden und Rosskastanien einen Durchmesser von ca. 5 m und Scheinakazien einen Durchmesser von ca. 6 m. Bei einem Alter von 80 Jahren steigt der Kronendurchmesser auf knapp 20 m bei Platanen, auf ca. 14 m bei Winterlinden und Scheinakazien sowie auf ca. 11 m bei Rosskastanien an (Abb. 10).

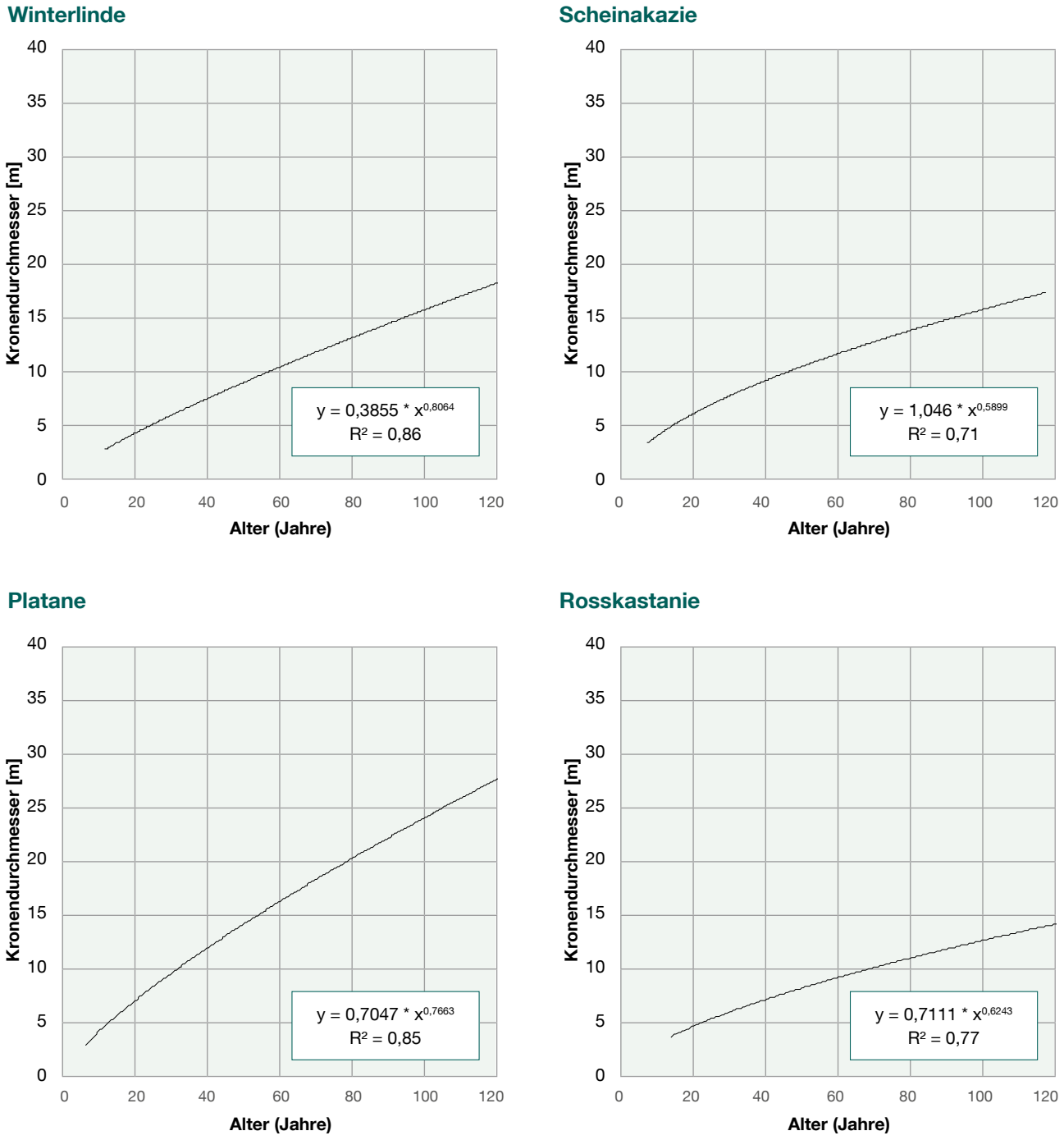


Abbildung 10: Kronendurchmesser in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß.

Standraum

Die Kronenprojektionsfläche, d. h. der von der Krone überdeckte Standraum eines Baumes, entwickelt sich proportional zum Kronendurchmesser. Während die Kronenprojektionsfläche bei der Rosskastanie fast linear nur gering zunimmt, steigt sie bei der Platane mit zunehmendem Alter deutlich an. Winterlinden und Scheinakazien zeigen ein ähnliches Verhalten. Mit 20 Jahren liegt die durchschnittliche Kronenprojektionsfläche von Platanen bei ca. 30–40 m², bei Winterlinden und Rosskastanien bei etwa 10 m² und bei Scheinakazien bei ca. 20 m². Eine 80 Jahre alte Rosskastanie hat einen Standraum von knapp 100 m², während Winterlinden und Scheinakazien im gleichen Alter 140-160 m² Fläche bedecken. Dagegen weisen Platanen mit 80 Jahren eine Projektionsfläche von mehr als 300 m² auf (Abb. 11).

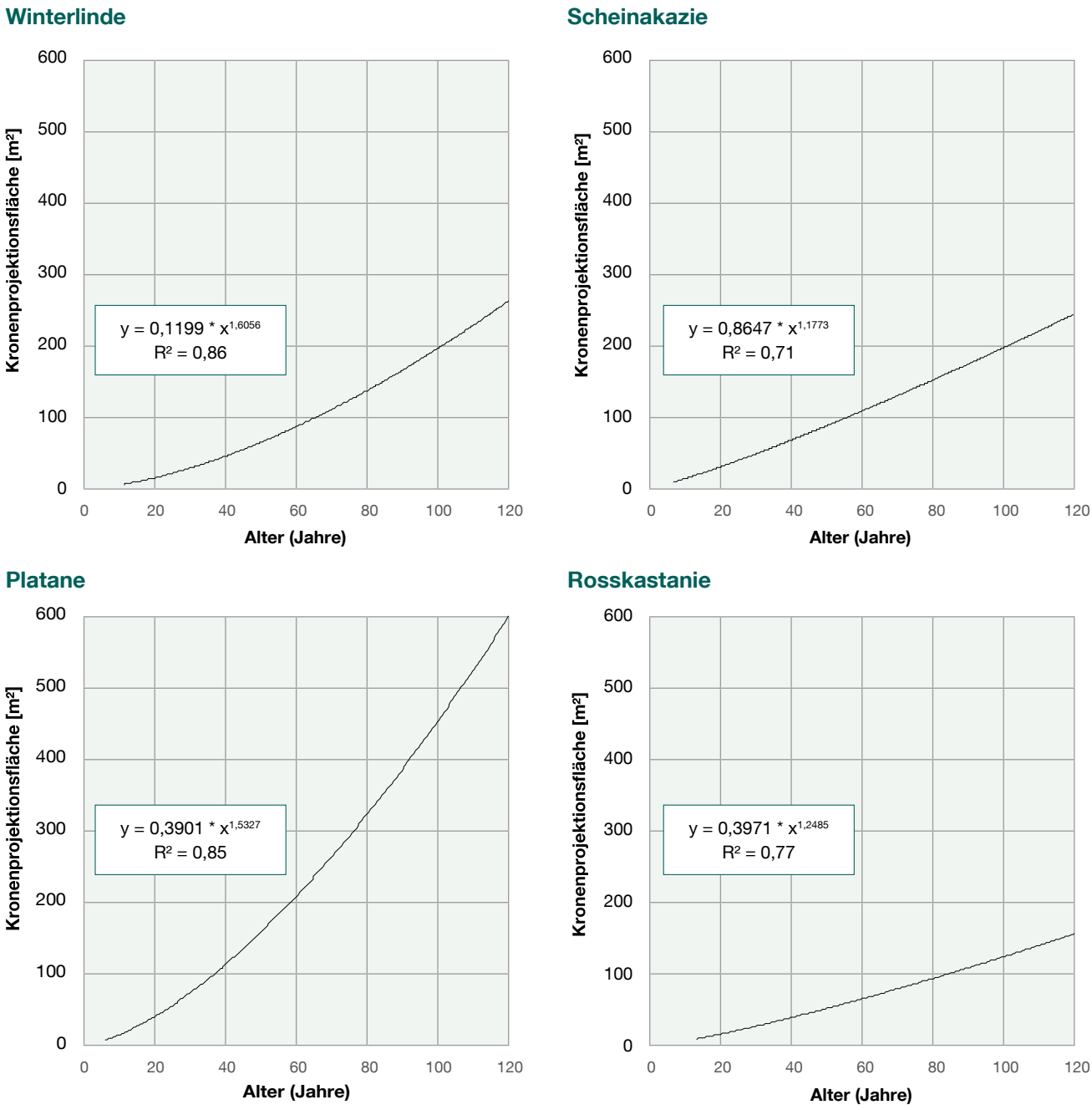


Abbildung 11: Standraum in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß.

Kronenvolumen

Auch das Kronenvolumen ist eng mit dem Standraum bzw. der Kronenprojektionsfläche eines Baumes verknüpft. Demzufolge zeigt die altersabhängige Entwicklung des Kronenvolumens ein sehr ähnliches artspezifisches Verhalten. Die größten Kronenvolumina besitzen Platanen, gefolgt von Linden und Scheinakazien, während Kastanien die geringsten Kronenvolumina aufweisen. Mit 20 Jahren ist das durchschnittliche Kronenvolumen bei den Platanen am größten, alle vier Arten weisen jedoch in diesem Alter weniger als 200 m³ Volumen auf. Eine 80-jährige Platane hat dagegen 7.000 m³ Kronenvolumen, Kastanien ähnlichen Alters besitzen ein signifikant geringeres Kronenvolumen von etwa 1.700 m³. Linden und Scheinakazien haben mit 80 Jahren ein Kronenvolumen von ungefähr 2.100 m³. Wird also viel Schatten benötigt und ist auseichend Platz vorhanden, sollten großkronige Baumarten gewählt werden (vgl. 6.2).

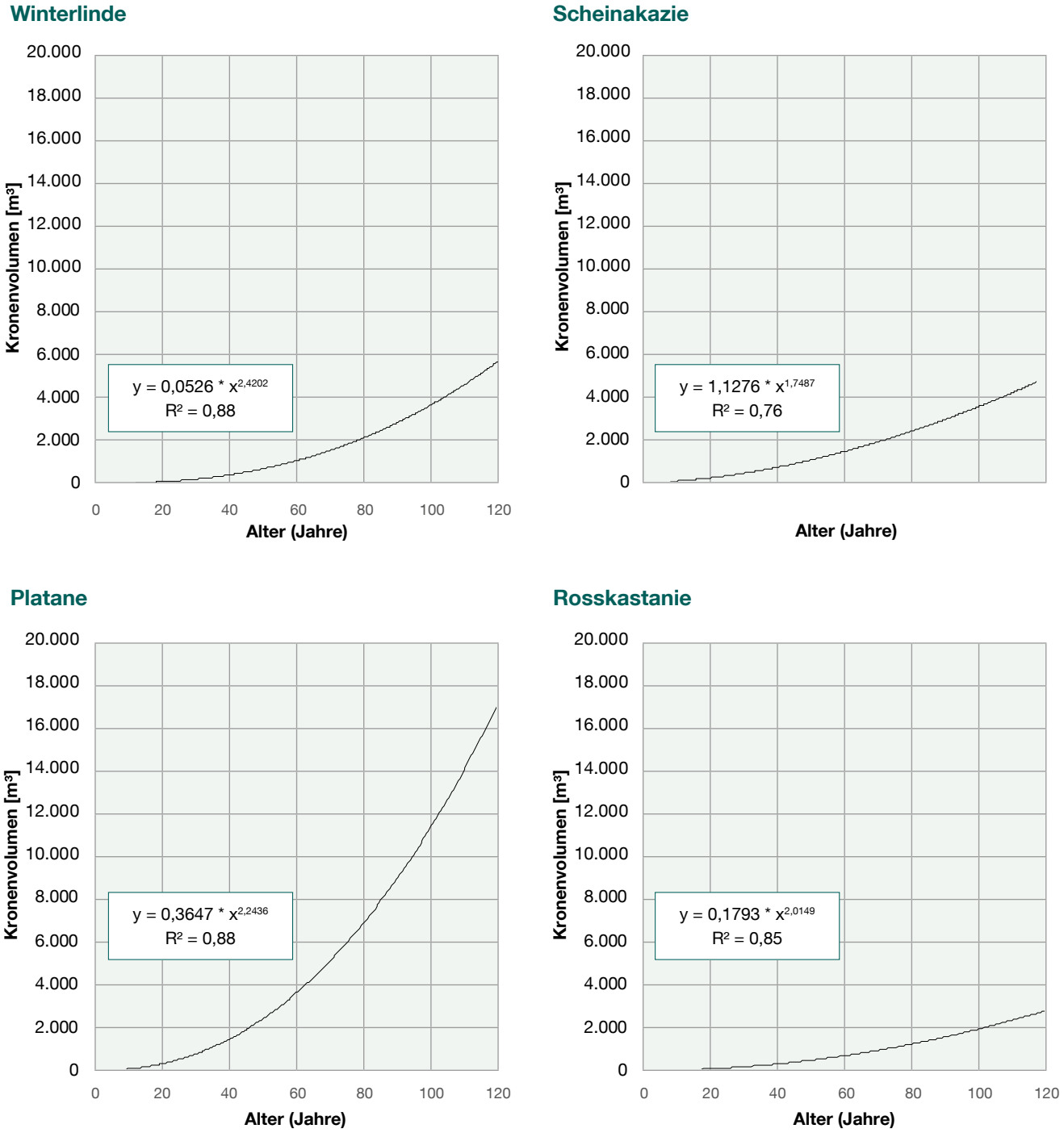


Abbildung 12: Kronenvolumen in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten (Annahme: Kronenform = Zylinder). R^2 ist das Bestimmtheitsmaß.

6.2 Beschattung

Die Beschattung durch Bäume weicht standörtlich innerhalb Bayerns nur geringfügig voneinander ab. Deshalb sind die folgenden Abbildungen für das Mittel der sechs bayerischen Städte dargestellt. Die beschattete Fläche bezieht sich auf den 20. Juni, d. h. den Tag im Jahresverlauf mit der längsten astronomischen Sonnenscheindauer. Die beschattete Fläche ist das Mittel der Schattenfläche von 8 Uhr morgens bis 6 Uhr abends, d. h. der Zeit, in der die Kühlung durch Beschattung relevant ist. Sie hängt im Wesentlichen von der Dimension des Baumes und dem Sonnenstand ab (Abb. 13, 14). Aufgrund dieser Abhängigkeit zeigen auch hier Platanen ab einem Alter von ca. 20 Jahren die deutlich größte Beschattungsfläche, während Rosskastanien die geringste Schattenfläche aufweisen. Bis zu einem Alter von 20 Jahren ist die Schattenfläche der vier Baumarten noch relativ ähnlich und liegt zwischen 20 m² und 80 m². Mit 80 Jahren beschatten Platanen aber schon 420 m², Winterlinden 290 m², Scheinakazien 280 m² und Rosskastanien lediglich 170 m².

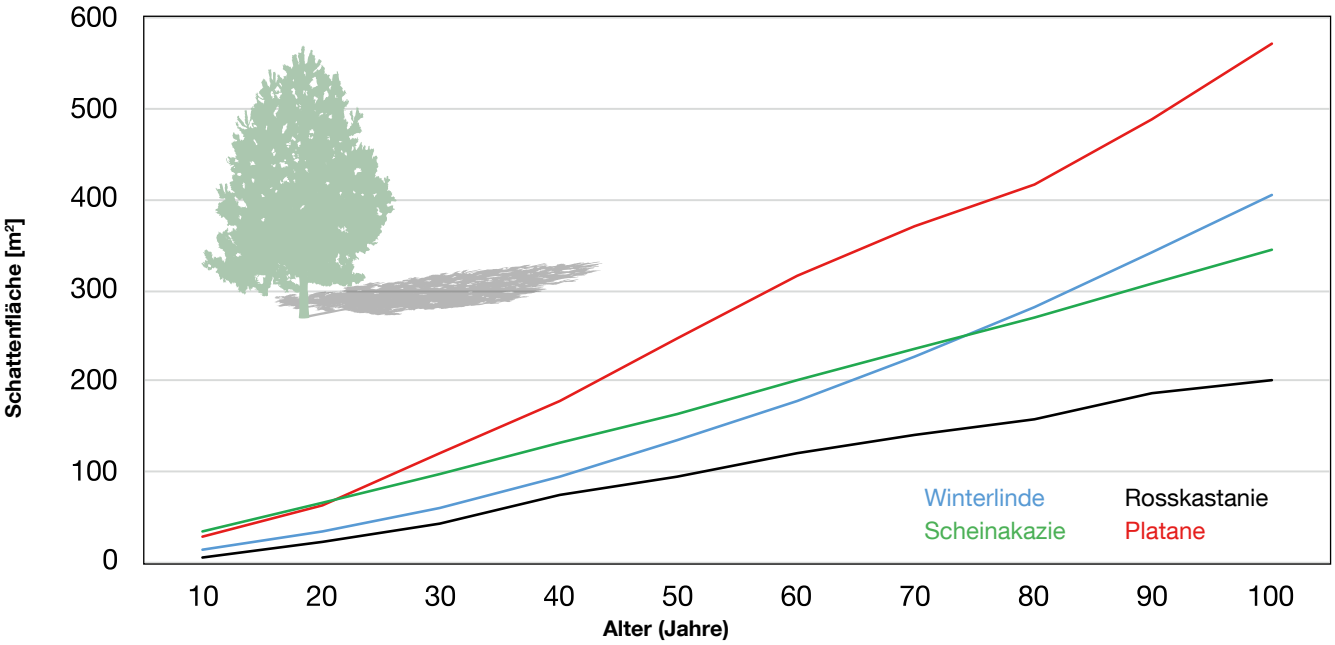


Abbildung 13: Mittlere beschattete Fläche von 8 Uhr morgens bis 6 Uhr abends am 20. Juni des Jahres in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten in bayerischen Städten.

Abbildung 14: Modellierung des Schattenwurfs eines Baumes über einen Tag (Quelle: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde)

Während Platanen eine deutlich größere Oberfläche verschatten können, ist ihr Schatten andererseits deutlich lichter als bei Baumarten wie Winterlinde oder Rosskastanie (Abb. 15). Aber auch die Transparenz der Baumkrone, d. h. die Schattendichte ist für die Kühlwirkung wichtig. Sie kann aus der Blattfläche und dem Kronenvolumen des Baumes berechnet werden (= m² Blattfläche pro m³ Kronenvolumen). Je höher dieser Wert ausfällt, desto dichter ist die Krone, d. h. desto größer ist die Schattenwirkung.

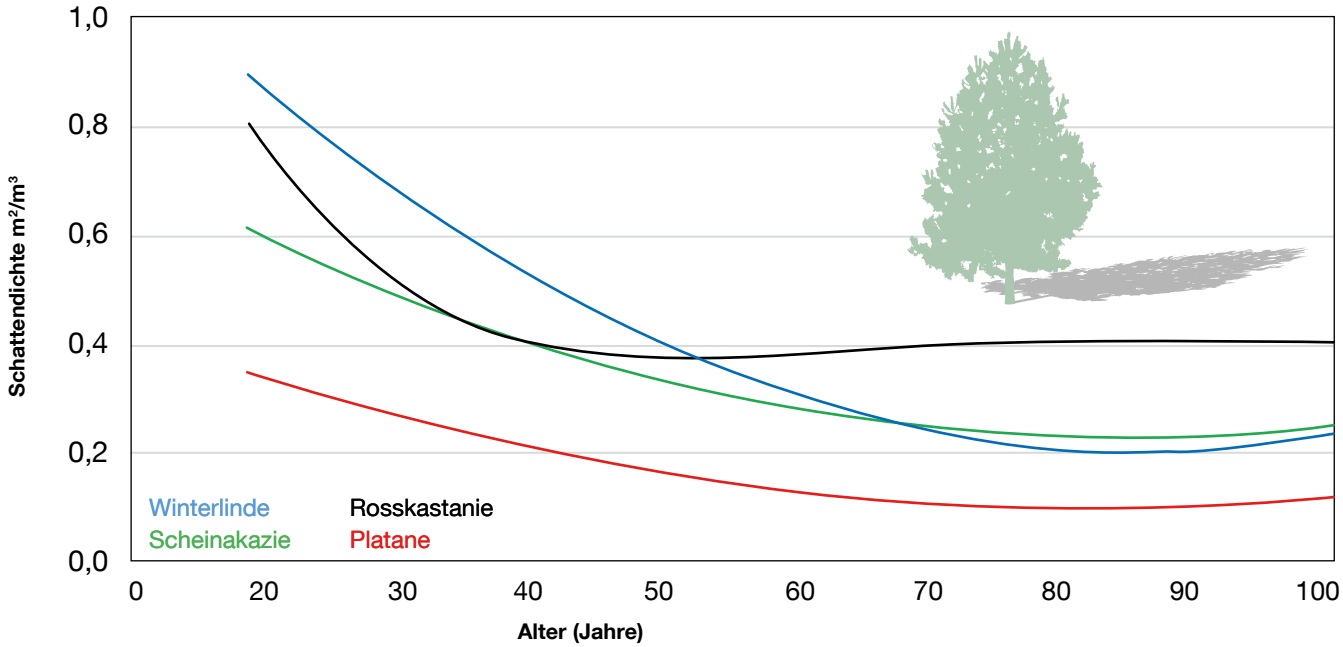


Abbildung 15: Schattendichte im Juni in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten in bayerischen Städten.

Im Vergleich zur Schattenfläche zeigen sich bei der Schattendichte umgekehrte Ergebnisse. Während die Platane große Flächen verschatten kann, ist ihr Schatten verhältnismäßig licht. Rosskastanien dagegen haben im Vergleich zu den anderen Baumarten, insbesondere im höheren Alter, eine sehr dichte Schattenfläche. Winterlinden und Scheinakazien zeigen mittlere Dichten, wobei im hohen Alter die Schattendichte von Scheinakazien wieder leicht ansteigt und dichter als der Schatten von Winterlinden wird. Bei Winterlinden nimmt mit zunehmendem Alter die Schattendichte stark ab (von knapp 0,9 $m^2\ m^{-3}$ bei 20-jährigen Bäumen bis rund 0,2 $m^2\ m^{-3}$ bei über 70-jährigen Bäumen). Eine große Schattenwirkung und damit eine starke Abkühlung während heißer Tage kann also nicht nur durch Baumarten mit großen Kronenvolumen erreicht werden. Dicht belaubte Baumarten können die gleiche Wirkung erzielen und benötigen dafür sogar weniger Standraum (Abb. 16).

Abbildung 16: Straßenbaumallee in München mit Schattenwurf für ein angenehmes Stadtklima (Quelle: Werner Lang)

6.3 Biomassezuwachs, CO_2-Fixierung, Transpiration und Kühlung

In den Abbildungen 17 bis 24 sind die Jahreswerte des Biomassenzuwachses, der CO_2-Fixierung, der Transpiration und der Kühlung durch Verdunstung altersabhängig und für jede Baumart sowie in Abhängigkeit des Versiegelungsgrades im Mittel aller bayerischen Städte dargestellt. Die Werte werden für das klimatische Mittel von 1965 bis 2015 und für die nahe Zukunft (2026–2050) im Mittel über alle bayerischen Städte gezeigt. Wie die Abbildungen bzw. die Tabellen im digitalen Anhang zu verwenden sind, ist in Kapitel 7 anhand mehrerer Beispiele dargestellt. Die Werte für die einzelnen Städte können über die ZSK-Homepage heruntergeladen werden (www.zsk.tum.de).

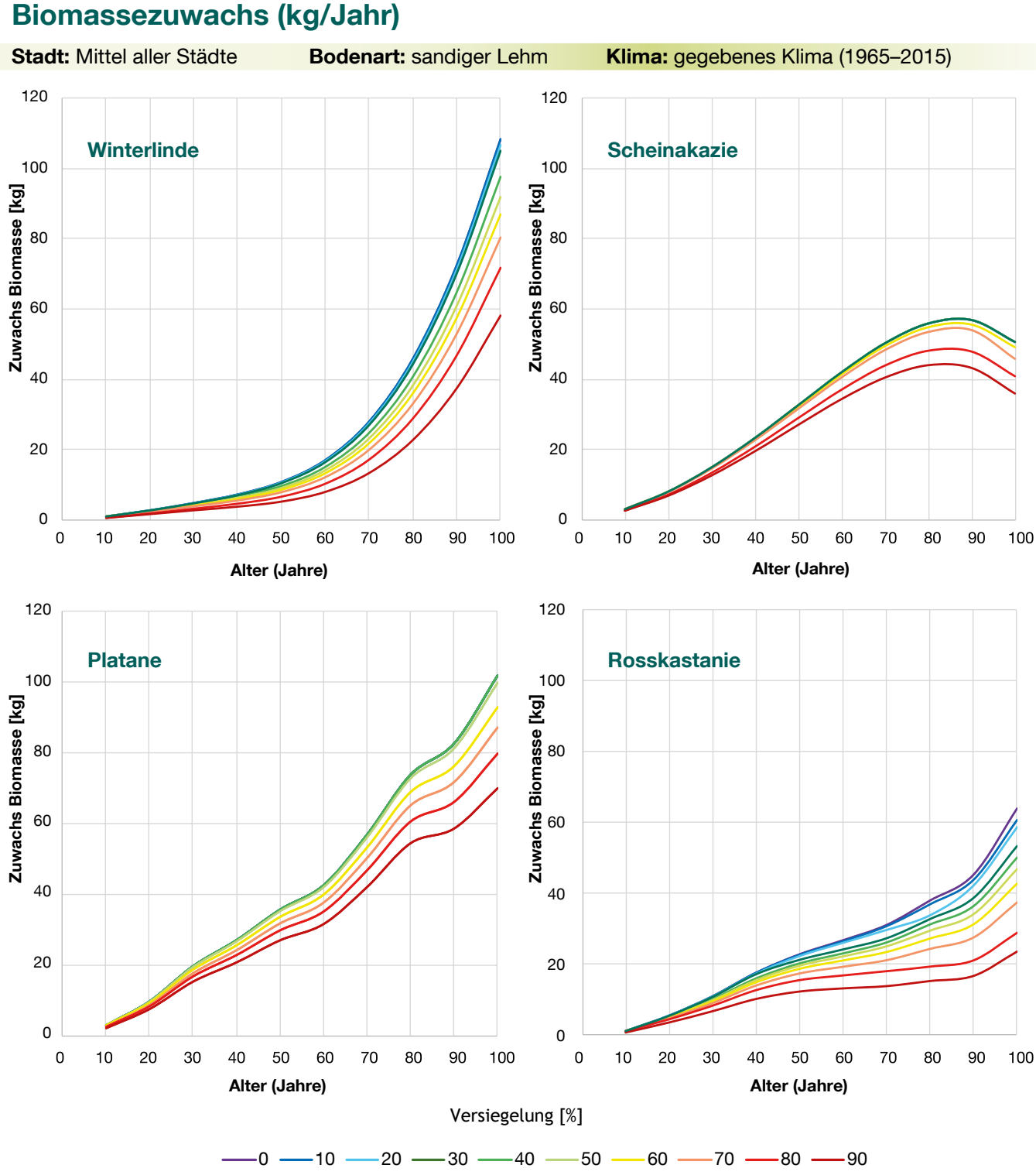


Abbildung 17: Biomassezuwachs von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima.

Transpiration (m³/Jahr)

Stadt: Mittel aller Städte **Bodenart:** sandiger Lehm **Klima:** gegebenes Klima (1965–2015)

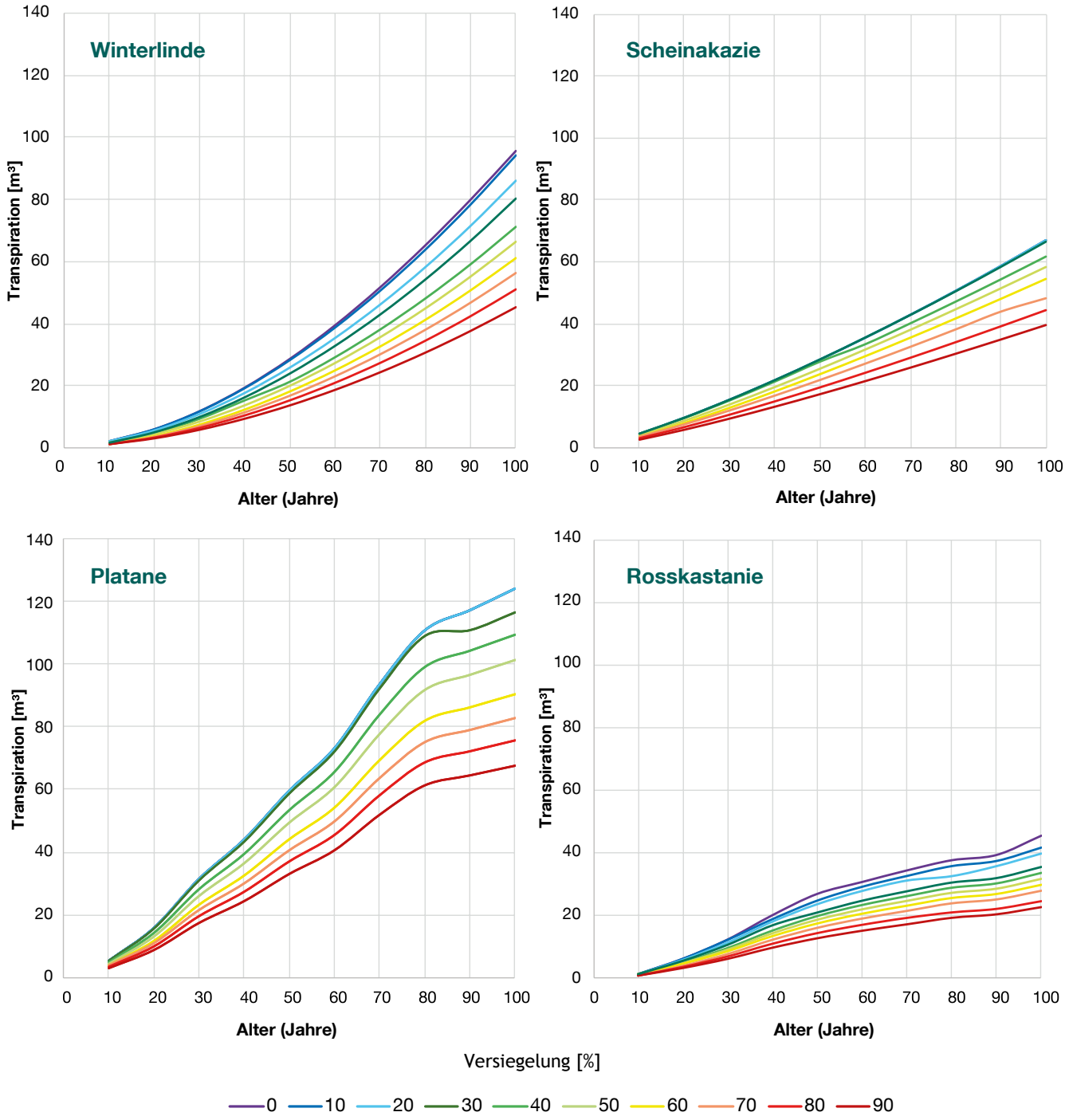


Abbildung 18: Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima.

CO_2-Fixierung (kg CO_2/Jahr)

Stadt: Mittel aller Städte **Bodenart:** sandiger Lehm **Klima:** gegebenes Klima (1965–2015)

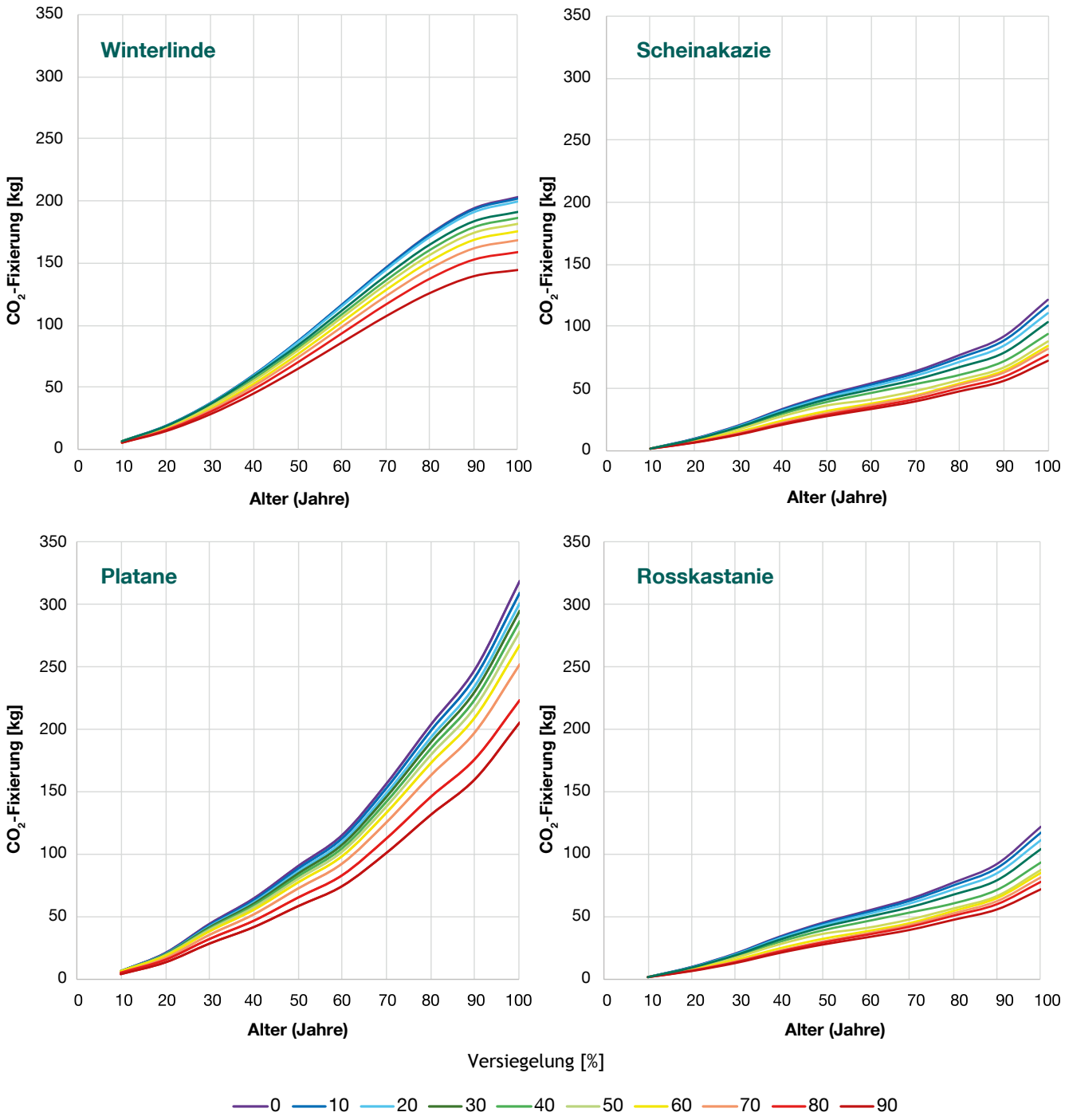


Abbildung 19: Kohlendioxidfixierung von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima.

Kühlung durch Transpiration (kWh/Jahr)

Stadt: Mittel aller Städte **Bodenart:** sandiger Lehm **Klima:** gegebenes Klima (1965–2015)

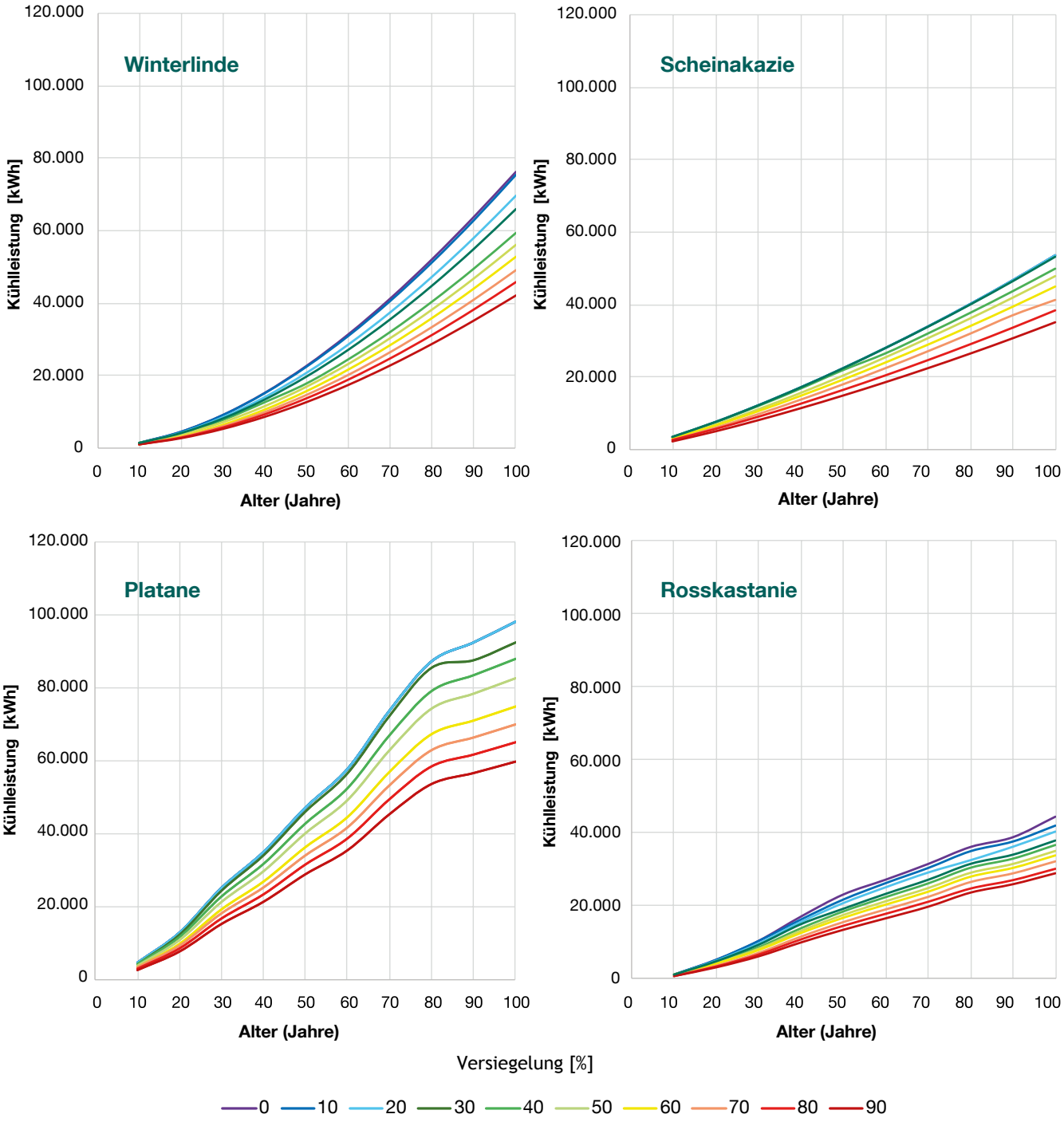


Abbildung 20: Kühlung durch Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima.

Biomassezuwachs (kg/Jahr)

Stadt: Mittel aller Städte **Bodenart:** sandiger Lehm **Klima:** Klima der nahen Zukunft (2026–2050)

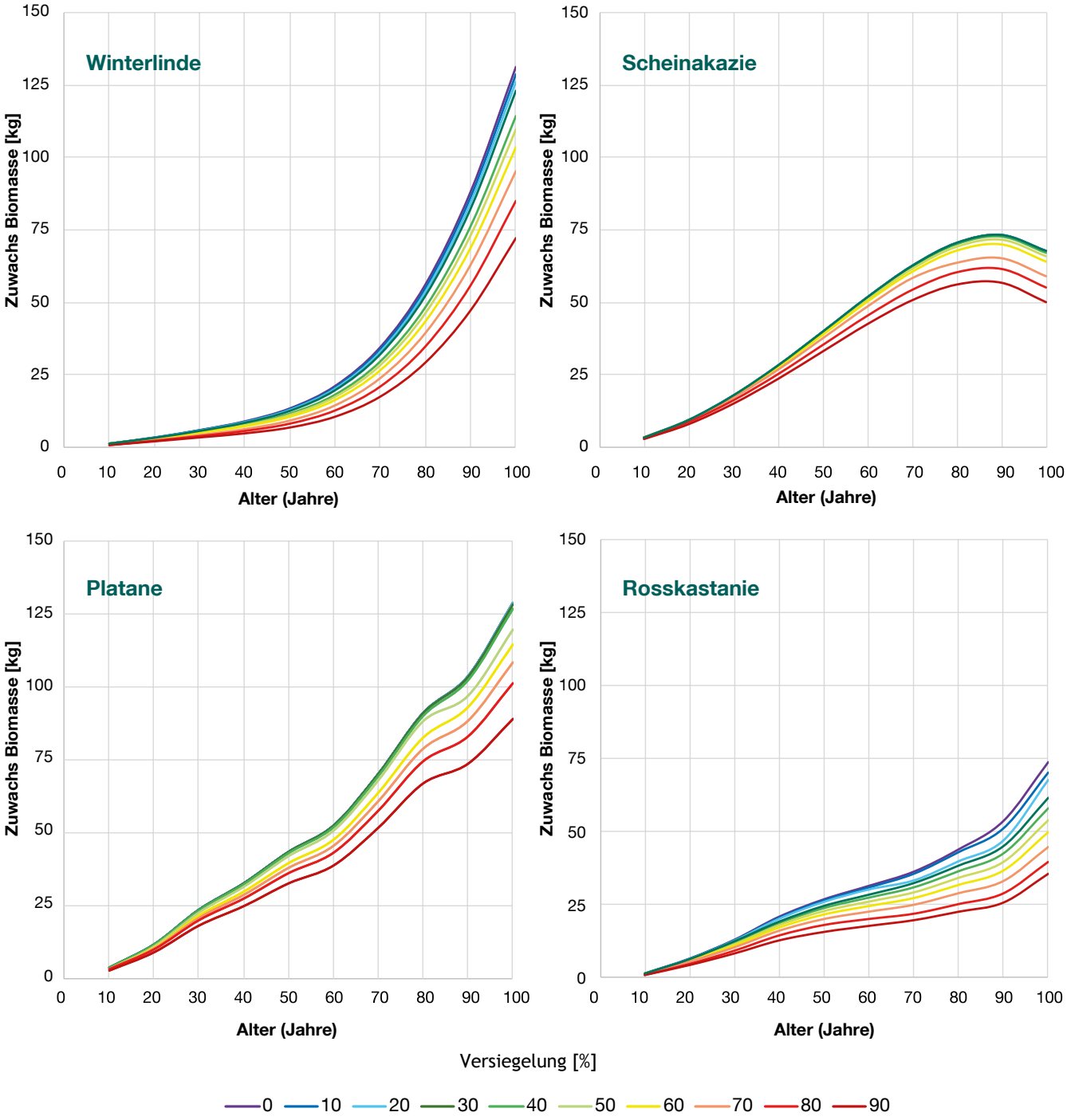


Abbildung 21: Biomassezunahme von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima.

Transpiration (m³/Jahr)

Stadt: Mittel aller Städte **Bodenart:** sandiger Lehm **Klima:** Klima der nahen Zukunft (2026–2050)

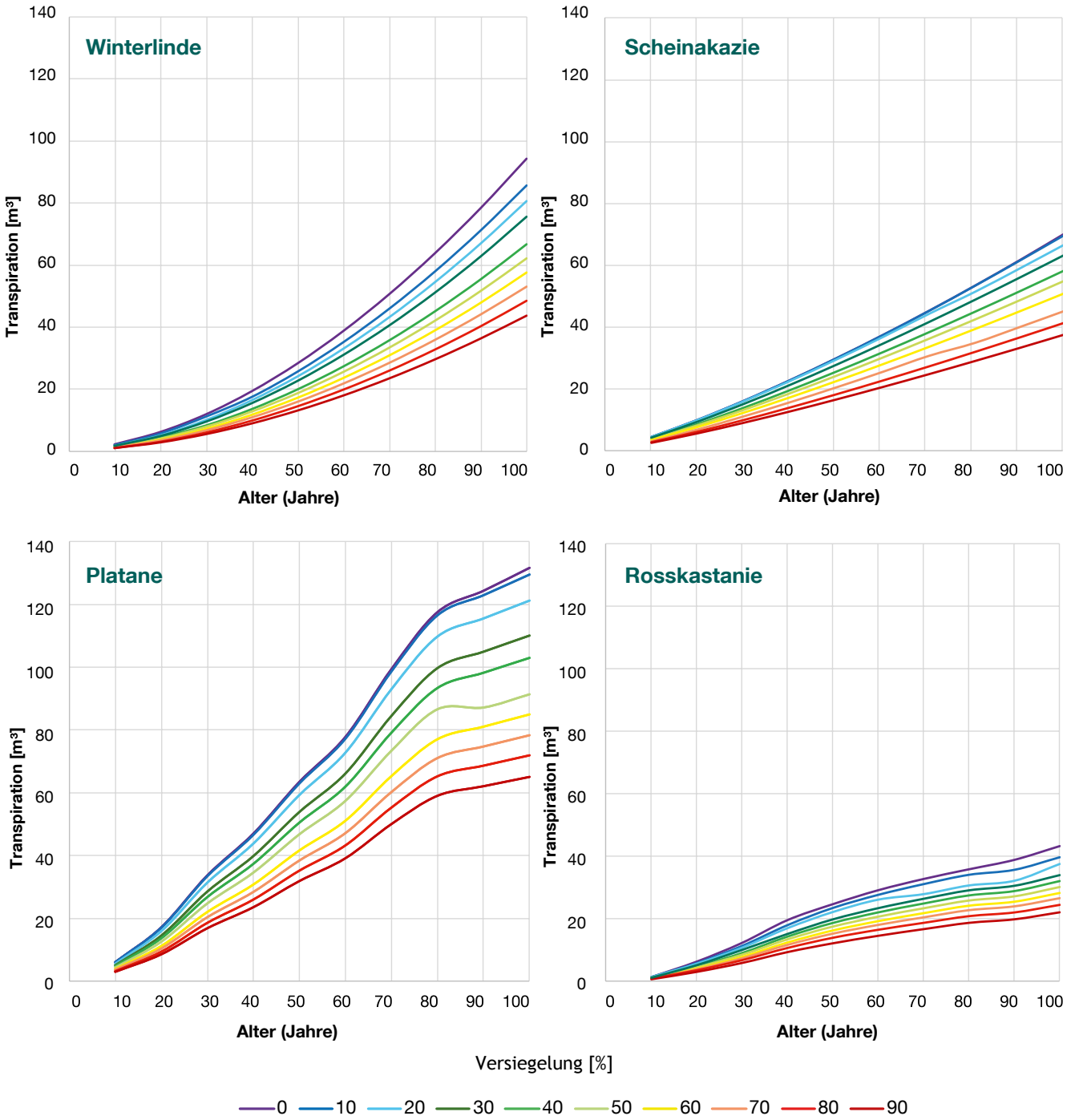


Abbildung 22: Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima.

CO_2-Fixierung (kg CO_2/Jahr)

Stadt: Mittel aller Städte **Bodenart:** sandiger Lehm **Klima:** Klima der nahen Zukunft (2026–2050)

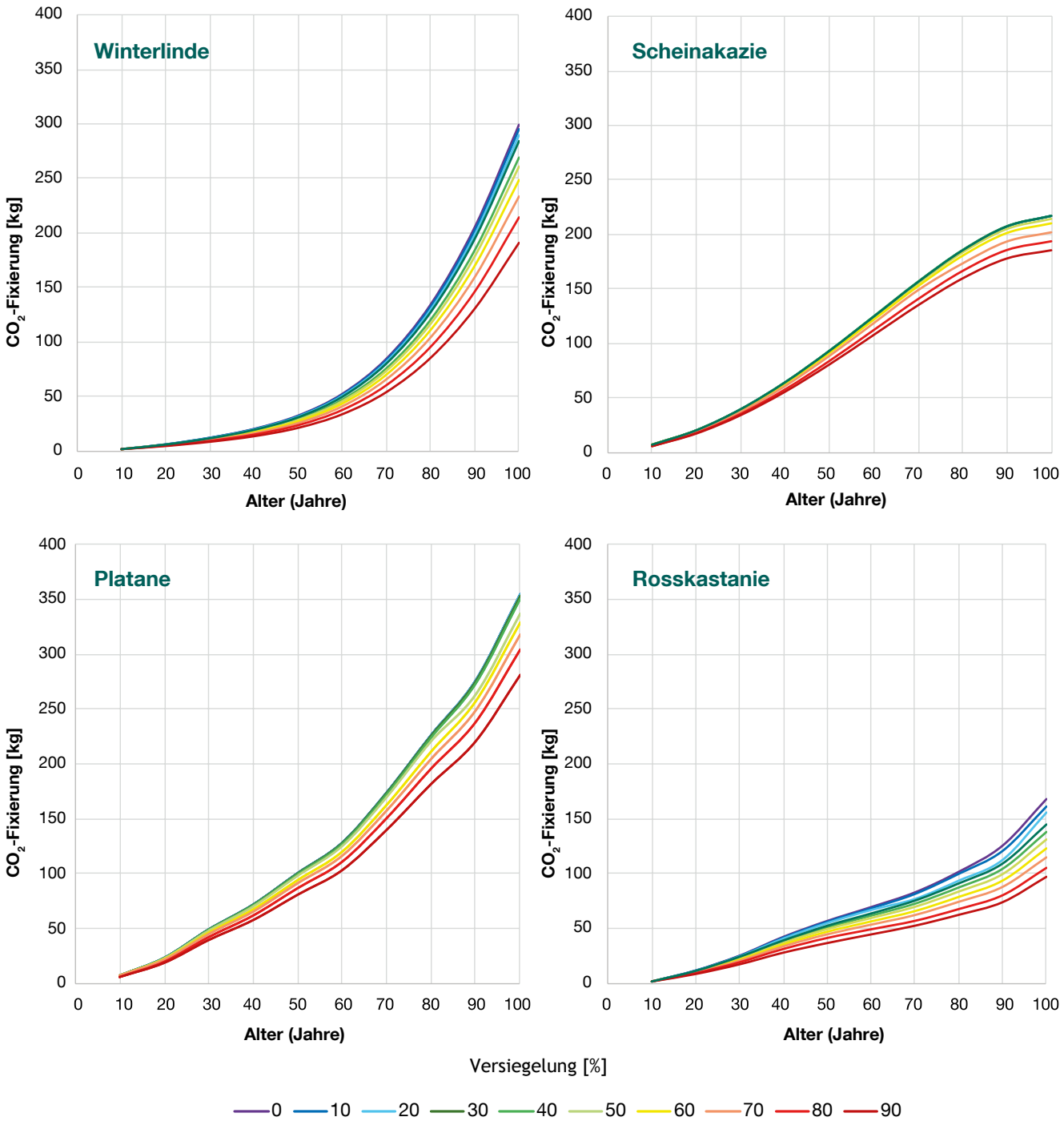


Abbildung 23: Kohlendioxidfixierung von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima.

Kühlung durch Transpiration (kWh/Jahr)

Stadt: Mittel aller Städte **Bodenart:** sandiger Lehm **Klima:** Klima der nahen Zukunft (2026–2050)

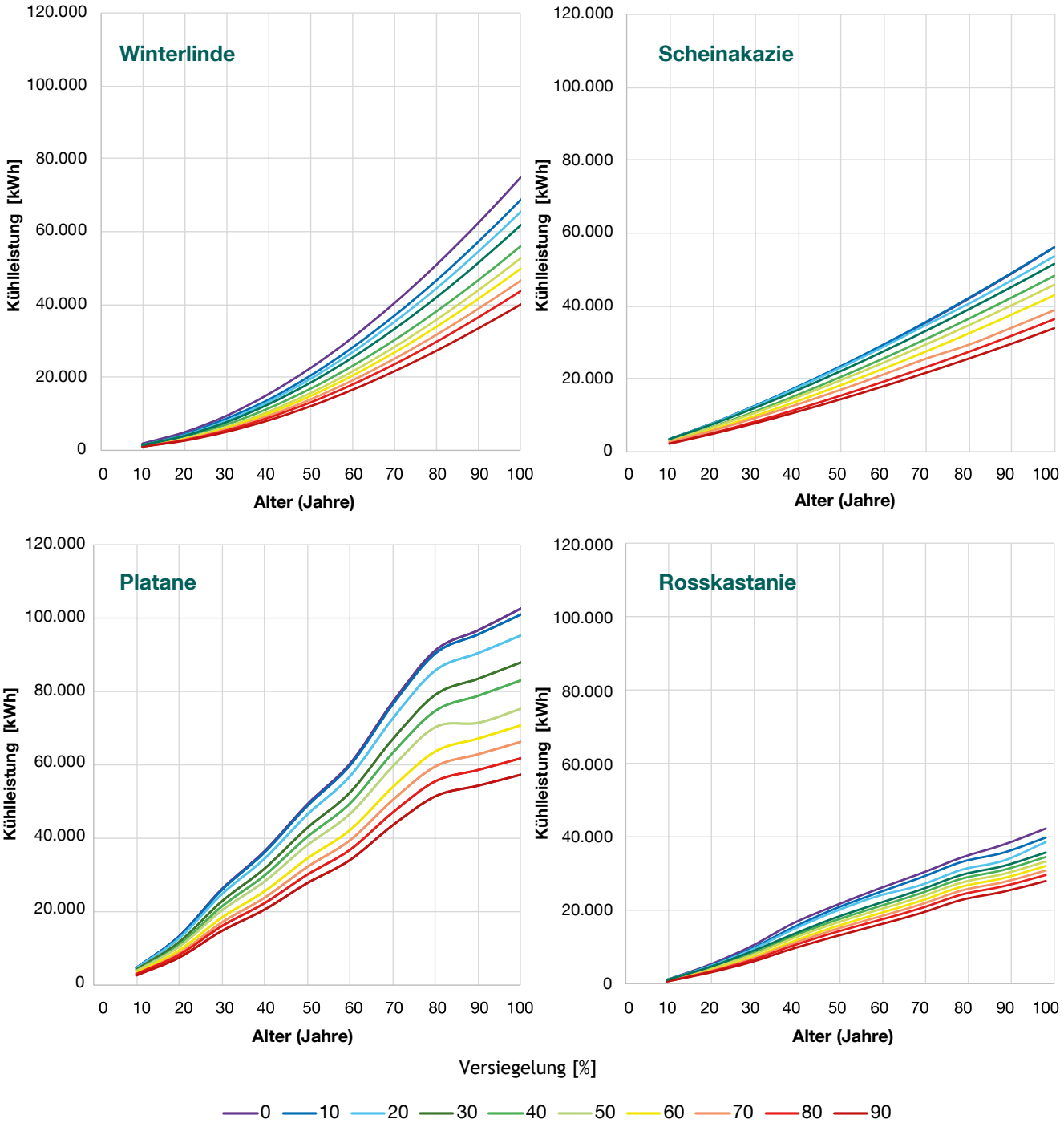


Abbildung 24: Kühlung durch Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima.

6.4 Auswirkungen kleinräumiger Standortbedingungen

Kleinräumige Standortbedingungen können das Baumwachstum und die Ökosystemleistungen einer Baumart erheblich beeinflussen. Insbesondere der Einfluss der Bodenart und die Veränderung des Strahlungsgenusses einer Baumart spielen eine große Rolle.

Bodenart

Hinsichtlich der Bodenart bestimmt vor allem der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt (BWGPfl) das Verhalten der Bäume. Abbildung 25 zeigt die Veränderung des mittleren jährlichen Biomassezuwachses und der mittleren jährlichen Kühlleistung durch Transpiration der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) in Abhängigkeit vom pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt im Mittel der sechs bayerischen Städte. Die Grafiken geben die relative Abweichung des Biomassezuwachses auf sandigem Lehm bei einem Versiegelungsgrad von 50 % für die jeweilige Baumart an.

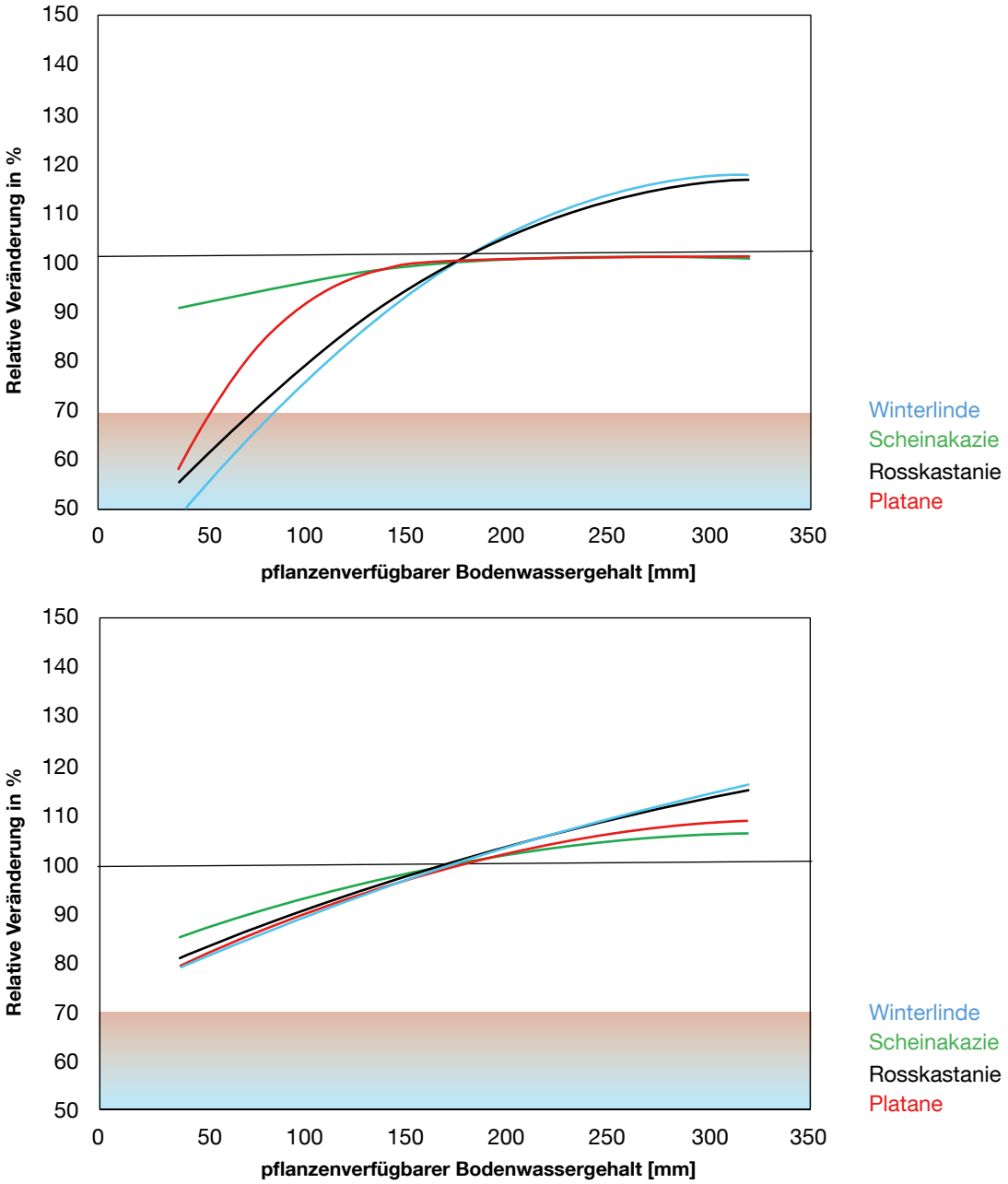


Abbildung 25: **Oben:** Relative Veränderung des mittleren jährlichen Biomassezuwachses der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) in Abhängigkeit vom maximalen pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): sandiger Lehm mit BWGPfl = 170 mm.
Unten: Relative Veränderung der mittleren jährlichen Kühlungsleistung durch Transpiration der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) in Abhängigkeit vom pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): sandiger Lehm mit BWGPfl = 170 mm.

Im Mittel der bayerischen Städte sind bei einem niedrigen maximalen BWGPfl deutliche Unterschiede bei den jeweiligen Baumarten hinsichtlich des Biomassezuwachses zu erkennen. Insbesondere Winterlinden und Rosskastanien zeigen starke Rückgänge im Biomassezuwachs von bis zu 40 %, wenn der BWGPfl unter 60 mm abfällt. Das Wachstum der Scheinakazie wird von einem geringen BWGPfl am wenigsten beeinflusst. Bei höheren BWGPfl-Werten zeigen Platane und Scheinakazie keine Reaktion, während Rosskastanie und Winterlinde vom höheren Wasserangebot profitieren.

Auch die Kühlleistung durch Transpiration wird vom pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt beeinflusst. Die Kühlleistung von Rosskastanie und Winterlinde steigt mit zunehmendem BWGPfl um bis zu 15 % an. Bei geringeren Bodenwassergehalten reduziert sich die Kühlleistung im Vergleich aller vier Baumarten bei der Platane am stärksten (20 %). Bei Neupflanzungen sollte deshalb darauf geachtet werden, dass baumartspezifisch ein hinreichend großer pflanzenverfügbarer Bodenwasserspeicher vorhanden ist. Dies fördert nicht nur das Baumwachstum sondern erhöht auch die Ökosystemleistungen wie die Kühlung durch Transpiration.

Strahlung

Die Strahlung, die ein Baum empfängt, kann an einem kleinräumigen Standort durch Gebäude und Objekte in der Umgebung eingeschränkt sein. Auch sie beeinflusst das Wachstum eines Baumes in hohem Maße. Durch Reflexion aber auch aufgrund eines veränderten Klimas kann die Strahlungssumme sich jedoch auch erhöhen. Abbildung 26 zeigt den Einfluss veränderter Strahlungssummen auf den Biomassezuwachs von 60 Jahre alten Bäumen für die vier Baumarten im Mittel der sechs bayerischen Städte. Insbesondere bei einer verminderten Strahlung sollte bei der Auswahl der Bäume die Art berücksichtigt werden, um ein optimales Wachstum zu gewährleisten und die Ökosystemleistungen zu verbessern.

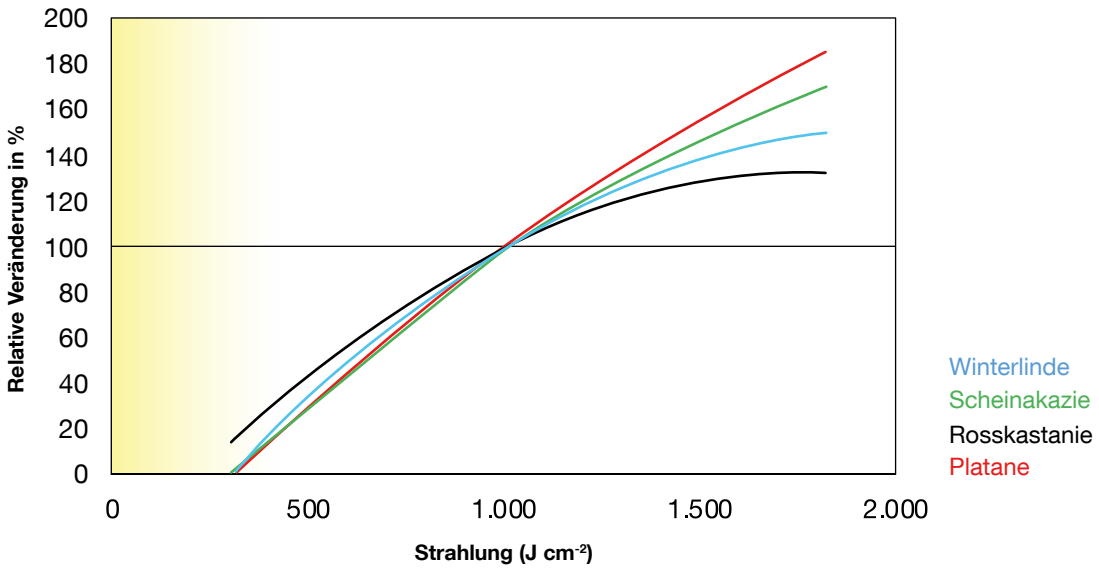


Abbildung 26: Relative Veränderung des mittleren jährlichen Biomassezuwachses der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): mittlere Strahlungssumme der sechs Städte.

Die Scheinakazie zeigt bei einer Erhöhung des Strahlungsangebotes eine starke Zunahme des Biomassezuwachses. Diese fällt bei Platane, Winterlinde und besonders bei der Rosskastanie deutlich geringer aus. Bei Einschränkungen der jährlichen Strahlungssumme reduziert sich der Zuwachs bei allen Baumarten sehr deutlich. Rosskastanien zeigen dabei eine schwächere, aber immer noch deutliche Reaktion auf eine Strahlungsreduktion.

Kühlleistung

Während sich die Kühlleistung aller vier Baumarten durch Transpiration bei einem höheren Strahlungsangebot nur geringfügig ändert (Abb. 27), bewirkt ein eingeschränktes Strahlungsangebot insbesondere bei Rosskastanie und Scheinakazie einen deutlichen Rückgang um bis zu 20 %.

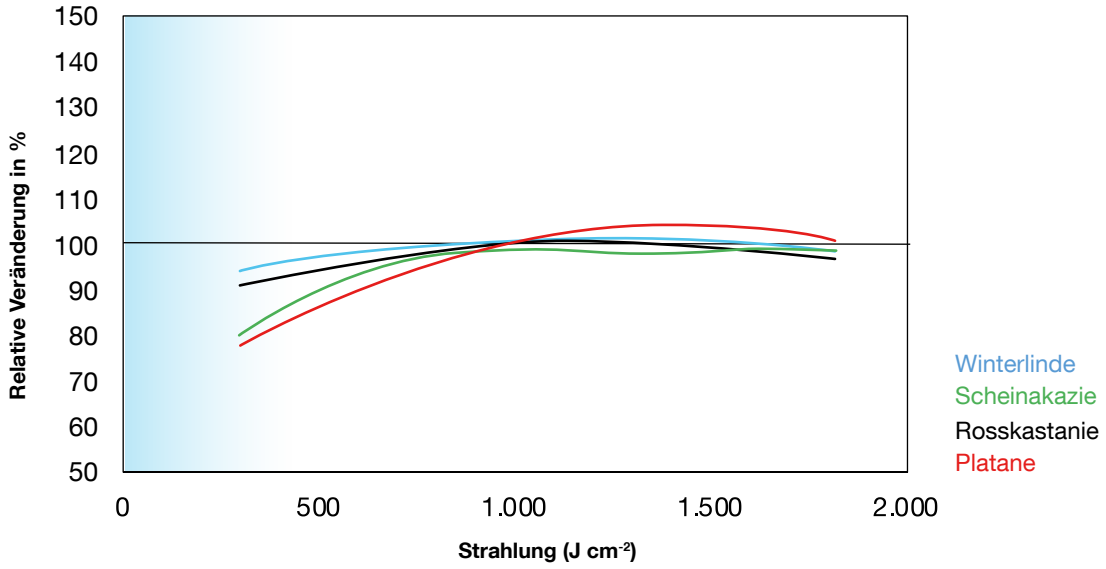


Abbildung 27: Relative Veränderung der mittleren jährlichen Kühlungsleistung der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) durch Transpiration in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): mittlere Strahlungssumme der sechs Städte.

Bildquelle: Thomas Rötzer – Hohenzollernplatz, München

Anleitung mit Beispielen

Anleitung mit Beispielen

Im Folgenden sollen ausgewählte Beispiele zeigen, wie der Leitfadens angewandt werden kann.

Liegt das Alter eines Baumes nicht vor, kann es mit Hilfe des Durchmessers auf Brusthöhe (BHD in cm) bzw. der Baumhöhe (h in m) abgeschätzt werden. Die Gleichungen sind baumartenspezifisch und stammen aus der Literatur. Die Gleichungen zur Winterlinde und zur Rosskastanie wurden Lukaszkiewicz und Kosmala (2008) entnommen, die zur Platane Bühler et al. (2007) und die zur Scheinakazie Dwyer (2009, Werte für Gleditschie).

Winterlinde *(T. cordata):*	Alter (in Jahren) = $-264{,}073 + e^{(5{,}5834 + 0{,}3397 * BHD/100 + 0{,}0026*h)}$
Scheinakazie *(R. pseudoacacia):*	Alter (in Jahren) = 0,996 * BHD
Platane *(P. x acerifolia):*	Alter (in Jahren) = 1.01 * BHD
Rosskastanie *(A. hippocastanum):*	Alter (in Jahren) = $-54{,}2714 + e^{(4{,}0709 + 0{,}7988 * BHD/100 + 0{,}0209*h)}$

Beispiel 1: Wie hoch ist der Zuwachs an Biomasse von zehn 60 Jahre alten Winterlinden und fünf 70 Jahre alten Scheinakazien auf einem Platz in München, der zu 40 % versiegelt ist?

Aus Abbildung 28 (Quelle: elektronischer Anhang auf www.zsk.tum) lässt sich für die Stadt München unter den aktuellen Klimabedingungen bei einer Versiegelung von 40 % (Vorgabe Bodenart: lehmiger Sand) ein Biomassezuwachs von 20 kg pro Jahr für eine 60-jährige Winterlinde und von 58 kg pro Jahr für eine 70-jährige Scheinakazie ablesen.

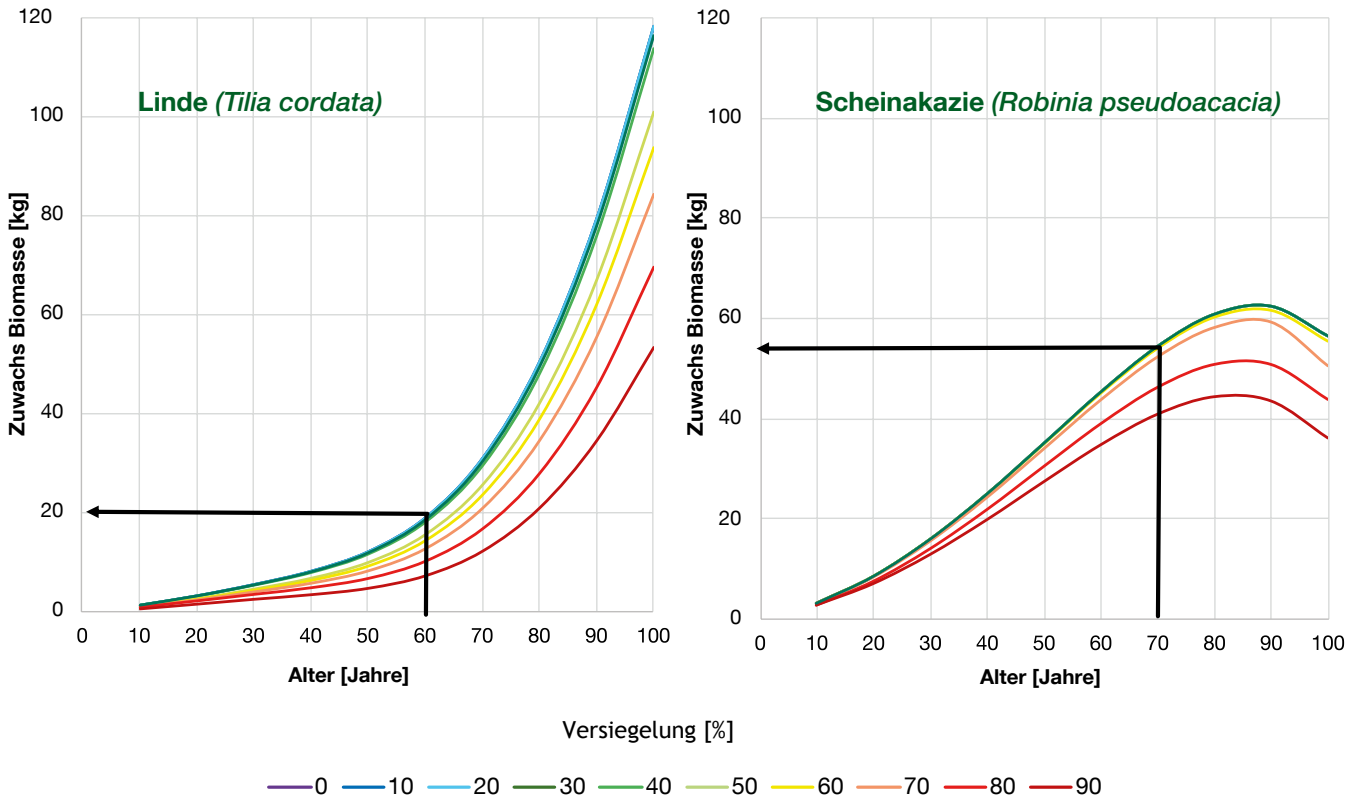


Abbildung 28: Biomassezuwachs von Winterlinden und Scheinakazien in München für das gegebene Klima 1965–2015 (Quelle:elektronischer Anhang auf www.zsk.tum.de).

Für den gesamten Bestand des Platzes ergibt dies einen mittleren jährlichen Zuwachs an Biomasse von 10 * 20 kg + 5 * 58 kg = 490 kg.

Beispiel 2: Wie verändert sich der Biomassezuwachs des Baumbestandes am gleichen Platz, wenn der pflanzenverfügbare Bodenwassergehalt deutlich geringer ist, d. h. bei 120 mm liegt statt bei 170 mm?

Aus Beispiel 1 ergibt sich ein jährlicher Biomassezuwachs von 20 kg pro Baum für die Winterlinden und von 58 kg pro Baum für die Scheinakazien. Aufgrund der Bodenart reduziert sich beim Beispiel 2 der Zuwachs der Winterlinden auf 83 % und derjenige der Scheinakazien auf 98 % (Abb. 25 oben). Die entsprechende Gleichung ist:

$$(10 * 20\ kg) * 0{,}83 + (5 * 58\ kg) * 0{,}98$$

Somit ergibt sich für den Boden mit der geringeren Wasserspeicherkapazität ein jährlicher Gesamtzuwachs für den Platz von **450 kg,** d. h. eine Reduzierung um **40 kg** Biomasse.

Beispiel 3: Wie hoch ist der Zuwachs an Biomasse in 30 Jahren für die Bäume des Beispiels 1?

In 30 Jahren sind die Winterlinden 90 Jahre alt, die Scheinakazien 100 Jahre. Der Abbildung 29 (Quelle: elektronischer Anhang auf www.zsk.tum.de) können die Zuwächse unter den prognostizierten Klimabedingungen des nahen Zukunft (Zeitraum 2026–2050) entnommen werden.

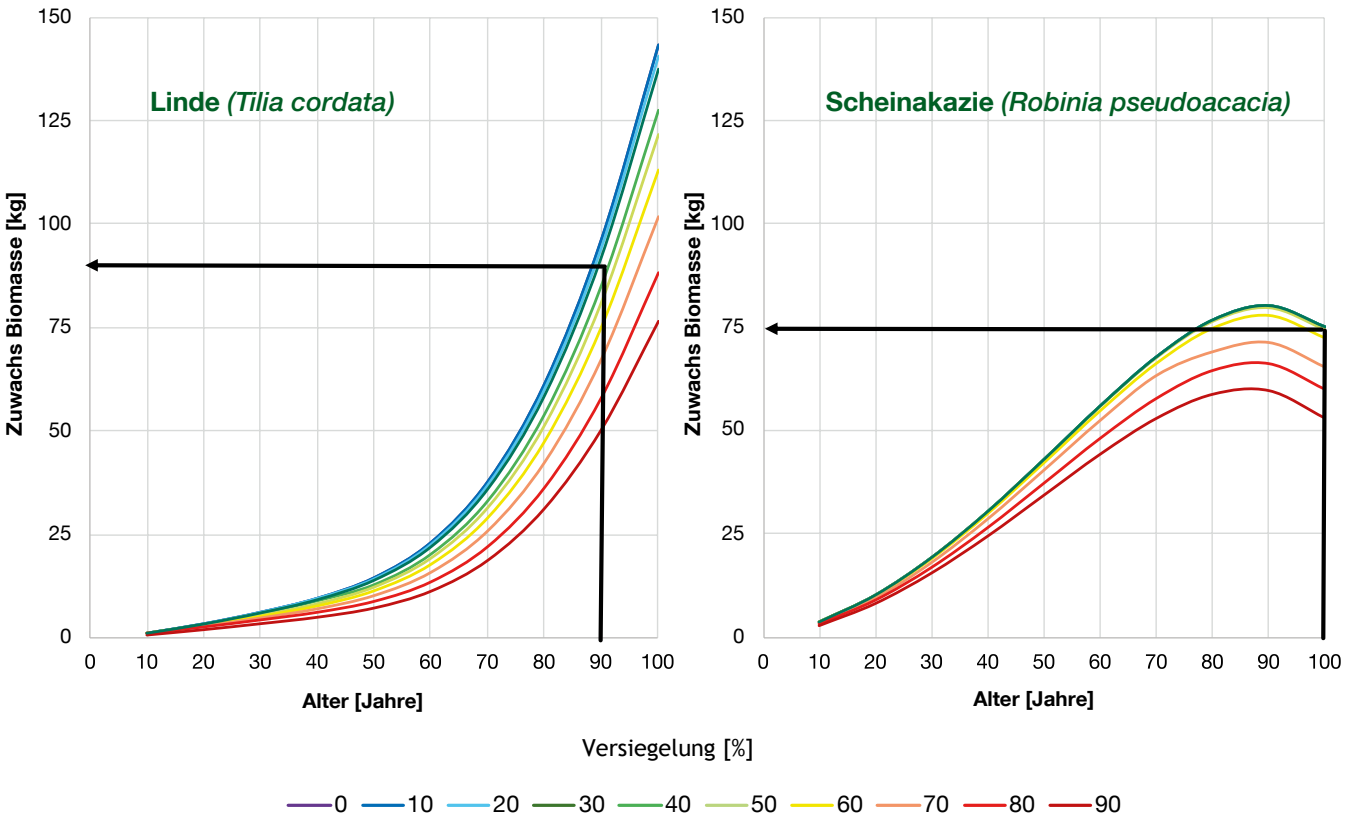


Abbildung 29: Biomassezuwachs von Winterlinden und Scheinakazien in München für das Klima der nahen Zukunft (Quelle: elektronischer Anhang auf www.zsk.tum.de).

Der jährliche Biomassezuwachs ist wie folgt zu errechnen:
10 * 85 kg + 5 * 75 kg = 1.225 kg.

Beispiel 4: Wie hoch ist das Gesamtvolumen der Verdunstung des Baumbestands auf einem Platz in München unter den Bedingungen des Beispiels 1?

Aus Tabelle 7 für Winterlinden und Tabelle 8 für Scheinakazien kann der jährliche Wasserverbrauch der einzelnen Bäume abgeschätzt werden (Quelle: elektronischer Anhang auf www.zsk.tum.de).

	Versiegelungsgrad									
Alter	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**
10	2,3	2,3	2,3	2,1	2,0	1,7	1,5	1,4	1,2	1,0
20	6,6	6,6	6,6	6,1	5,6	4,9	4,4	4,0	3,5	3,0
30	13,1	13,1	13,1	11,9	11,0	9,5	8,7	7,8	6,9	5,9
40	21,7	21,7	21,6	19,5	17,9	15,5	14,1	12,7	11,3	9,7
50	32,1	32,1	31,9	28,5	26,3	22,8	20,7	18,6	16,5	14,2
60	44,3	44,3	43,8	39,0	35,9	31,1	28,3	25,4	22,6	19,5
70	58,0	58,0	57,3	51,0	46,9	40,7	36,9	33,2	29,5	25,5
80	73,2	73,2	72,3	64,3	59,2	51,3	46,6	41,9	37,2	32,2
90	89,7	89,7	88,8	79,0	72,8	63,0	57,3	51,5	45,8	39,5
100	107,3	107,3	106,4	95,1	87,6	75,9	69,0	62,0	55,1	47,5

Tabelle 7: Jährlicher Wasserverbrauch in m³ je Versiegelungsgrad in Prozent für Winterlinden der Altersstufen 10 bis 100 Jahre (Quelle: elektronischer Anhang auf www.zsk.tum.de).

	Versiegelungsgrad									
Alter	**0**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**
10	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7	4,2	3,8	3,3	2,8
20	10,6	10,6	10,6	10,6	10,6	10,3	9,2	8,3	7,2	6,2
30	17,1	17,1	17,1	17,1	17,1	16,6	14,8	13,3	11,5	10,0
40	24,1	24,1	24,1	24,1	24,1	22,5	20,8	18,7	16,1	14,1
50	31,6	31,6	31,6	31,6	31,6	29,3	27,1	24,4	21,0	18,3
60	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4	36,4	33,7	30,3	26,1	22,8
70	47,7	47,7	47,7	47,7	47,7	43,9	40,4	36,4	31,4	27,3
80	56,3	56,3	56,3	56,3	56,0	51,5	47,4	42,6	36,7	32,0
90	65,2	65,2	65,2	65,2	64,8	59,4	54,5	49,1	42,3	36,8
100	74,5	74,5	74,5	74,5	73,9	67,5	61,8	53,6	47,9	41,7

Tabelle 8: Auszug aus Tabelle A39 (siehe elektronischer Anhang) – jährlicher Wasserverbrauch je Versiegelungsgrad in Prozent für Scheinakazien der Altersstufen 10 bis 100 Jahre

Die Formel lautet: 10 * 35,9 m³ + 5 * 47,7 m³.
D. h. die Gesamtverdunstung des Baumbestands erreicht ein Volumen von 597,5 m³ Wasser pro Jahr.

Beispiel 5: Auf einem Platz in Würzburg (Versiegelungsgrad: 20 %) stehen zwanzig frisch gepflanzte, 10 Jahre alte Scheinakazien und zwei 80 Jahre alte Platanen. Wie hoch sind die Ökosystemleistungen CO_2-Fixierung, Verdunstung und Kühlleistung durch Transpiration des Baumbestandes?

Auch in diesem Fall können die Werte der Einzelbäume den entsprechenden Abbildungen aus dem elektronischen Anhang (siehe www.zsk.tum.de) entnommen werden. Im elektronischen Anhang sind dies die Abbildungen A62, A63 und A64 sowie die Tabellen A55, A56 und A57.

Es ergeben sich jährliche Mittelwerte für

die CO_2-Fixierung: 516 kg CO_2 (= 20 * 6,4 kg CO_2 + 2 * 194 kg CO_2),
die Verdunstung: 277 m³ Wasser (= 20 * 4,3 m³ + 2 * 95,3 m³) und
die Kühlleistung durch Transpiration: 211.428 kWh (= 20 * 3.256 kWh + 2 * 73.154 kWh).

Beispiel 6: Auf einem großen Platz in Bayreuth sollen 15 Rosskastanien und 15 Platanen gepflanzt werden (Pflanzalter 10 Jahre). Welche Baumhöhen, welche Standräume und welche Kronenvolumina nehmen die Bäume in 30 Jahren ein? Wie groß ist dann die beschattete Fläche im Hochsommer?

Anhand der Abbildungen 9, 11 und 12 (ab S. 45) lassen sich die Dimensionen der Bäume abschätzen, die sie in 30 Jahren aufweisen werden. Die Baumhöhe der 40-jährigen Rosskastanien wird dann bei **11 m** liegen, die der 40-jährigen Platanen bei **17 m.** Der Standraum der 15 Rosskastanien bzw. 15 Platanen wird eine Fläche von **450 m²** (= 15 * 30 m²) bzw. **1.650 m²** (= 15 * 110 m²) umfassen, was eine gesamte Standfläche von **2.100 m²** ergibt. Das Kronenvolumen einer 40-jährigen Rosskastanie liegt bei **300 m³**, das einer 40-jährigen Platane bei **1.450 m³.**

Aus Abbildung 10 (siehe S. 46) geht hervor, dass die Krone einer 40-jährigen Platane im Hochsommer eine Fläche von **200 m²** beschattet, während eine Rosskastanie des gleichen Alters eine Fläche von **80 m²** beschatten kann.

Die einzelnen Beispiele zeigen, wie anhand der Abbildungen und Tabellen des Leitfadens sowie des elektronischen Anhangs quantiative Angaben zu Wachstumsraten und Ökosystemleistungen für einzelne Städte Bayerns unter spezifischen Standortsbedingungen für das aktuelle Klima aber auch für die nahe Zukunft abgeleitet werden können. Somit lassen sich für gegebenen Plätze, Straßenzüge u.v.m. genaue Aussagen über die Leistungen von Stadtbäumen treffen, für Planungen können zukünftige Ökosystemleistungen abgeschätzt werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Bereitstellung verschiedener Ökosystemleistungen (z. B. Kohlenstoffspeicherung, Schattendichte, Verdunstung) über das Alter. | 21
Abbildung 2: Wärmebild des Alten Hofs in München. Die Gebäude zeichnen sich durch starke Hitzebelastung aus, während die Bäume kühlen (Quelle: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde). | 24
Abbildung 3: Stadtbäume an einem Parkstandort in München (Spenglerplatz) und an einem hoch versiegelten Standort in München (Fotos: Thomas Rötzer, Tiffany Ellner). | 28
Abbildung 4: Häufige Stadtbaumarten: Linde *Tilia cordata* in München, Scheinakazie *Robinia pseudoacacia* in Würzburg, Rosskastanie *Aesculus hippocastanum* in München, Platane *Plantanus x acerifolia* in Würzburg (Fotos: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Pixabay). | 29
Abbildung 5: Fisheye-Foto eines Stadtbaumes in Würzburg mit umliegender Bebauung zur Bestimmung des Blattflächenindex und des Lichteinfalls am Baumstandort (Quelle: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde). | 35
Abbildung 6: Schema und modulare Zusammensetzung des Wachstumsmodells CityTree. | 38
Abbildung 7: Lage und Klima der untersuchten bayerischen Städte (Kartenquelle: Agrar- und Umweltklimatologischer Atlas von Bayern, Rötzer et al., 1997). | 42
Abbildung 8: Mittlere monatliche Niederschlagssummen für das aktuelle Klima (1965–2015) und für die nahe Zukunft (2026–2050) des Szenario A1B im Mittel der sechs bayerischen Städte. | 43
Abbildung 9: Baumhöhe in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß. | 45
Abbildung 10: Kronendurchmesser in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß. | 46
Abbildung 11: Standraum in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten. R^2 ist das Bestimmtheitsmaß. | 47
Abbildung 12: Kronenvolumen in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten auf Basis von Messungen von ca. 2.000 Bäumen in bayerischen Städten (Annahme: Kronenform = Zylinder). R^2 ist das Bestimmtheitsmaß. | 48
Abbildung 13: Mittlere beschattete Fläche von 8 Uhr morgens bis 6 Uhr abends am 20. Juni in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten in bayerischen Städten. | 49
Abbildung 14: Modellierung des Schattenwurfs eines Baumes über einen Tag (Quelle: Lehrstuhl für Waldwachstumskunde). | 49
Abbildung 15: Schattendichte im Juni in Abhängigkeit vom Baumalter für die vier Stadtbaumarten in bayerischen Städten. | 50
Abbildung 16: Straßenbaumallee in München mit Schattenwurf für ein angenehmes Stadtklima (Quelle: Werner Lang). | 50
Abbildung 17: Biomassezuwachs von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima. | 51
Abbildung 18: Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima. | 52
Abbildung 19: Kohlendioxidfixierung von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima. | 53
Abbildung 20: Kühlung durch Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das gegenwärtige Klima. | 54
Abbildung 21: Biomassezunahme von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima. | 55
Abbildung 22: Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima. | 56
Abbildung 23: Kohlendioxidfixierung von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima. | 57
Abbildung 24: Kühlung durch Transpiration von Winterlinden, Scheinakazien, Rosskastanien und Platanen in Bayern mit steigendem Alter und bei verschiedenen Versiegelungsgraden für das zukünftige Klima. | 58
Abbildung 25: Oben: Relative Veränderung des mittleren jährlichen Biomassezuwachses der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) in Abhängigkeit vom maximalen pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): sandiger Lehm mit BWGPfl = 170 mm.
Unten: Relative Veränderung der mittleren jährlichen Kühlungsleistung durch Transpiration der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) in Abhängigkeit vom pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalt im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): sandiger Lehm mit BWGPfl = 170 mm. | 59
Abbildung 26: Relative Veränderung des mittleren jährlichen Biomassezuwachses der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): mittlere Strahlungssumme der sechs Städte. | 60
Abbildung 27: Relative Veränderung der mittleren jährlichen Kühlungsleistung der vier Baumarten (Baumalter 60 Jahre) durch Transpiration in Abhängigkeit vom Strahlungsangebot im Mittel der sechs bayerischen Städte; Basis (=1): mittlere Strahlungssumme der sechs Städte. | 61
Abbildung 28: Ausschnitt aus Abbildung A45 (siehe elektronischer Anhang) – Biomassezuwachs von Winterlinden und Scheinakazien in München für das gegebene Klima. | 64
Abbildung 29: Ausschnitt aus Abbildung A49 (siehe elektronischer Anhang) – Biomassezuwachs von Winterlinden und Scheinakazien in München für das Klima der nahen Zukunft. | 61
Baumsilhouetten: rawpixel.com / Freepik

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung von Baumarten nach der Trockentoleranz (1 = sehr hoch bis 4 = sehr gering) und dem Wasserbedarf (1 = sehr gering bis 4 = sehr hoch) nach Roloff (2013). Rot markiert sind die untersuchten Baumarten. | 31
Tabelle 2: Ökosystemdienstleistungen von Stadtgrün. | 34
Tabelle 3: Charakteristika der vier Stadtbaumarten (Robinie = Scheinakazie). | 39
Tabelle 4: Geografie und Klima der untersuchten bayerischen Städte (Temp.: Temperatur, Nie.: Niederschlag). Die klimatischen Werte beziehen sich auf den Zeitraum 1965–2015. | 42
Tabelle 5: Mittlere jährliche Temperaturen und Niederschlagssummen der sechs bayerischen Städte für das Szenario A1B (Klimamodell WettReg) der nahen Zukunft (2026–2050) und Differenzen gegenüber dem aktuellen Klima (1965-2015) (Spekat et al., 2007). | 43
Tabelle 6: Kenngrößen der Bäume in zehn Altersklassen für die Baumarten Winterlinde *(T. cordata),* Scheinakazie *(R. pseudoacacia),* Platane *(P. x acerifolia)* und Rosskastanie *(A. hippocastanum).* Angegeben ist das Mittel einer Altersklasse, d. h., dass z. B. in der Altersklasse 20 alle Bäume mit einem Alter zwischen 16 und 25 Jahren enthalten sind). | 44
Tabelle 7: Auszug aus Tabelle A39 (siehe elektronischer Anhang) – jährlicher Wasserverbrauch je Versiegelungsgrad in Prozent für Winterlinden der Altersstufen 10 bis 100 Jahre. | 66
Tabelle 8: Auszug aus Tabelle A39 (siehe elektronischer Anhang) – jährlicher Wasserverbrauch je Versiegelungsgrad in Prozent für Scheinakazien der Altersstufen 10 bis 100 Jahre. | 66

Literaturverzeichnis

BlueGreenStreets, 2020. BlueGreenStreets als multicodierte Strategie zur Klimafolgenanpassung – Wissenstand 2020, Hamburg. Statusbericht im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“.

Böll, S., 2018. Stadtbäume der Zukunft. Wichtige Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Stadtgrün 2021“. Sonderdruck aus: Veitshöchheimer Berichte 184, 75–85.

Böll, S., Albrecht, R., Mahsberg, D. (2019): Stadtklimabäume – geeignete Habitate für die urbane Insektenvielfalt?, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Veitshöchheim.

Bühler, O., Kristoffersen, P., Larsen, S.U., 2007. Growth of Street Trees in Copenhagen With Emphasis on the Effect of Different Establishment Concepts. Arboric Urban For 5, 330-337.

DWD – CDC, 2018. Deutscher Wetterdienst. Climate Data Center. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html. Abgerufen am 28.11.2018.

Dwyer, J.F., 2009. How old is that tree?, Oxford, UK

Ferrini, F., Konijnendijk van den Bosch, C. C., Fini, A., 2017. Routledge Handbook of Urban Forestry. Routledge, London.

GALK e. V., 2018. GALK Straßenbaumliste. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz.

Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K., 2008. Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, Dessau-Roßlau.

Kuttler, W., 2004. Stadtklima.Teil 1: Grundzüge und Ursachen. Umweltwissenschaften und Schadstoffforschung. Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie 16, 187–199.

Landeshauptstadt München, Baureferat Gartenbau, 2016. Zusätzliche Technische Vorschriften für die Herstellung und Anwendung verbesserter Vegetationstragschichten. ZTV-Vergetationstragschichten (ZTV-Vegtra Mü) 5.

Limmer, T., 2018. Stadtbäume in Würzburg: Wie die Öffentlichkeit durch Informationsvisualisierungen sensibilisiert werden kann. HAW München, TU München, München.

Lukaszkiewicz, J., Kosmala, M., 2008. Determining the Age of Streetside Trees with Diameter at Breast Height-based Multifactorial Model. Arboric Urban For 34, 137–143.

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 Ecosyst 12, 95–113.

Meyer, F.H., 1978. Bäume in der Stadt. Ulmer Verlag, Stuttgart.

Moser-Reischl, A., Rötzer, T., Biber, P., Ulbricht, M., Uhl, E., Qu, L., Koike, T., Pretzsch, H. (2019): Growth of Abies sachalinensis along an urban gradient affected by environmental pollution in Sapporo, Japan. Forests 10, 707, 1–19.

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 Jagdzeitung 188, 94–111.

Niinemets, Ü., Valladares, F., 2006. Tolerance to shade, drought, and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. Ecol Monogr 76, 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. Q J R Meteorol Soc 108, 1–24.

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.

Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Schütze, G., Perkins, D., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., du Toit, B., Foster, K., Lefer, B., 2017. Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. Scientific Reports 7, 1-10. doi:10.1038/s41598-017-14831-w.

Rahman, M.A., Hartmann, Ch., Moser-Reischl, A., von Strachwitz, M., Paeth, H., Pretzsch, H., Pauleit, S., Rötzer, T. (2020): Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 287 (p.13) doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107947.

Rahman, M. A., Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., 2017. Within canopy temperature differences and cooling ability of Tilia cordata trees grown in urban conditions. Build Environ 114, 118–128.

Robine, J. M., Cheung, S. L., Le Roy, S., Van Oyen, H., Herrmann, S. R., 2008. Report on excess mortality in Europe during summer 2003, EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114.

Roloff, A., 2013. Bäume in der Stadt. Ulmer Verlag, Stuttgart.

Roloff, A., Bonn, S., Gillner, S., 2008. Konsequenzen des Klimawandels. Vorstellung der Klima-Arten-Matrix (KLAM) zur Auswahl geeigneter Bäume. Stadt + Grün 5, 53–60.

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.

Rötzer, T., Häckel, H., Würländer, R., 1997. Agrar- und umweltklimatologischer Atlas von Bayern: (1961–1990), 1 CD-ROM, Dateiverzeichnis (13 S.), Zolling: Deutscher Wetterdienst, Weihenstephan, ISBN 3-88148-334-9.

Rötzer, T., Rahman, F., Moser, 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.

Statista, 2018. https://de.statista.com/infografik/7429/einwohnerzahl-prognose-ausgewaehlter-staedte-in-deutschland/.

Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F., 2007. Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarien mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG 2005 auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI – OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES – Szenarien B1, A1B und A2. Projektbericht im Rahmen des F+E-Vorhabens 204 41 138 „Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland“. Mitteilungen des Umweltbundesamtes, [S.] 149.

StMUV, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2021. Klima-Report Bayern 2021. Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten, 196 S.

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.

TIB - Rötzer, T., Pretzsch, H., 2018. Stadtbäume im Klimawandel II. Wuchsverhalten, Umweltleistungen und Perspektiven. TU München, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Freising. Technische Informationsbibliothek Hannover.

Tubby, K. V., Webber, J.F., 2010. Pests and diseases threatening urban trees under a changing climate. Forestry 83, 451–459.

UN, 2018. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, Online Edition. Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York.

Watt, M. S., Kirschbaum, M.U.F., 2011. Moving beyond simple linear allometric relationships between tree height and diameter. Ecol Model 222, 3910–3916. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.10.011.

Wilhelm, L., 2019. Perspektiven mit neuen Baumarten im städtischen Bereich. Präsentation beim Kellerseminar am 14.03.2019, München.

ZSK - Lang, W., Pauleit, S., Brasche, J., Hausladen, G., Maderspacher, J., Schelle, R., Zölch, T., 2018. Leitfaden für klimaorientierteKommunen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung. TU München, München.

Abkürzungsverzeichnis

BHD	Brusthöhendurchmesser, Stammdurchmesser eines Baumes auf 1,3 m
BWGPFI	Pflanzenverfügbarer Bodenwassergehalt (BWGPFI)
CPA	Kronenprojektionsfläche
GALK	Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
UHI	Urban Heat Island, Städtischer Wärmeinseleffekt
ZSK	Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung

Glossar

Bezeichnung	Erklärung
Allometrie	Größenvergleich bzw. Proportionsverhältnisse einzelner Organe von Pflanzen wie z. B. Stamm – Laub oder BHD – Kronenvolumen
Anisohydrische Art	= hydrolabile (anisohydrische) Arten besitzen eine hohe stomatäre Leitfähigkeit und können bei geringen Wasserverfügbarkeiten weiterhin Photosynthese betreiben
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)
Evapotranspiration	Summe aus Transpiration und Evaporation
Feldkapazität	Wassermenge, die ein Boden gegen die Schwerkraft halten kann
Freiraum	nicht durch Gebäude bebaute Flächen, z. B. Park, Platz, Straße
Genetische Prägung	Expression eines Gens in Abhängigkeit des Elternteils
Isohydrische Art	= hydrostabile (isohydrische) Arten reagieren auf Trockenstress mit einer Verringerung der stomatären Leitfähigkeit zur Reduzierung von Wasserverlust, was bei lang anhaltender Trockenheit zu Wachstumseinbußen führen kann
Klimaresilient	Robust gegenüber klimatischen Veränderungen
Klimawandel	Auftretende Veränderungen des Klimas auf der Erde
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
Permanenter Welkepunkt	Austrocknungsgrad des Bodens, unter dem es zur irreversiblen Welke der Pflanze kommt
Pflanzenverfügbarer Bodenwassergehalt	Bodenwassergehalt, der von den Pflanzen aufgenommen werden kann
Raumanspruch	Platz, den ein Baum zum Wachsen benötigt
Regionalklima	Klima einer mesoskaligen Raumeinheit
Ringporer	Ringporige Hölzer bilden im Frühjahr weitlumige Gefäße
Schattenbaumart	Schattenbaumarten benötigen zum Wachstum weniger als ein Zehntel bis ein Hundertstel des Sonnenlichts
Standortverhältnisse	Eigenschaften eines Standorts bezüglich Klima, Wasserverfügbarkeit, Bodenversiegelung
Struktur/Strukturdimensionen	Baumparameter wie Höhe, Durchmesser, Kronengröße
Transpiration	Verdunstung von Wasser durch Organismen
Trockentoleranz	Fähigkeit von Pflanzen, Dürreperioden zu überstehen
Verdunstungskühlung	Abkühlung eines Mediums durch Entzug von Energie (Wärme), die durch die Verdunstung von Wasser entzogen wird
Wasserbedarf	Menge des benötigten Wassers
Wohlfahrtswirkungen/Ökosystemleistungen/Umweltleistungen	Direkte und indirekte Leistungen von Ökosystemen zum menschlichen Wohlergehen
Zerstreutporer	Zerstreutporige Hölzer (Zerstreutporer) bilden in etwa gleichmäßig große leitende Gefäße sowohl im Frühholz als auch im Spätholz

Anhang

Der elektronische Anhang zum Biomassezuwachs und den Ökosystemleistungen Transpiration, Kohlenstofffixierung und Verdunstung der vier Baumarten Winterlinde, Rosskastanie, Scheinakazie und Platane in Bayreuth, Hof, Kempten, München, Nürnberg und Würzburg unter derzeitigen und zukünftigen Klimabedingungen steht zum Download bereit auf:

www.zsk.tum.de

ZSK **Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung**

Zentrum Stadtnatur
und Klimaanpassung

finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz