



Leitfaden für Bäume in Pflanzgefäßen

Handlungsempfehlungen aus dem Projekt
Bäume in Pflanzgefäßen als stadtklimatisch
wirksame Maßnahme zur Anpassung an den
Klimawandel

Impressum

Herausgeber

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

Teilprojekt 9: Bäume in Pflanzgefäßen als stadtklimatisch wirksame Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel (Förderkennzeichen TEW01CO2P-75383)

Professur für Green Technologies in Landscape Architecture
Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Ludwig
Lehrstuhl für Strategie und Management in der Landschaftsentwicklung
Prof. Dr. Stephan Pauleit
Lehrstuhl für Waldwachstumskunde
Prof. Dr. Dr. Hans Pretzsch

Bearbeitung

Christoph Fleckenstein M.A., Lumi Kirk B.A., Vjosa Dervishi M.Sc., Dr. Mohamad A. Rahman
Prof. Dr. Stephan Pauleit, Prof. Dr. Thomas Rötzer, Prof. Dr.-Ing. Ferdinand Ludwig

Wissenschaftliche Hilfskräfte

Maddison Erdall, Pauline Philipp, Louis Blais, Philipp Endisch, Felix Zimmermann, Azharul Islam

Layout

Basierend auf dem Layout von Aczentrum Grafikbüro für den Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern,
Angepasst von Lumi Kirk B.A.

Finanziert durch

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München

Zitierhinweis

Fleckenstein, C., Kirk, L., Dervishi, V., Rahman, M.A., Pauleit, S., Rötzer, T. und Ludwig, F. (2024): Leitfaden für Bäume in Pflanzgefäßen. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Bäume in Pflanzgefäßen als stadtklimatisch wirksame Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel. Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung, 72 Seiten

Titelfoto

Wohnpark Alterlaa (Thomas Ledl, 2011)

Besonderer Dank gilt den Teilnehmer:innen der Experteninterviews, die mit ihrem Fachwissen und ihrer Praxiserfahrung geholfen haben, die Lücke zwischen Theorie und Praxis zu schließen. Zudem möchten wir uns bei den Mitarbeitenden des Gewächshauslaborzentrums Dürnast für ihre tatkräftige Unterstützung bedanken. Unser Dank gilt auch den Studierenden, die mit ihren Seminar- und Abschlussarbeiten zur Entwicklung der Entwurfstypologie beigetragen haben.

The background of the page is white with several large, irregular, light green shapes that resemble the silhouettes of tree canopies or foliage. These shapes are scattered across the page, with some overlapping. The overall aesthetic is clean and nature-oriented.

Leitfaden für Bäume in Pflanzgefäßen

Handlungsempfehlungen aus dem Projekt

Bäume in Pflanzgefäßen als stadtklimatisch wirksame Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel



Inhalt

6

Das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung

8

Einleitung

15

1 | Wie entwickeln sich Bäume in Pflanzgefäßen und was sind die wichtigsten Wachstumsfaktoren?

1.1 Allgemeine Grundlagen	16
1.2 Wachstum von Bäumen in Pflanzgefäßen	18
1.3 Reaktion auf Trocken- und Hitzestress	21
1.4 Zusammenhang zwischen Baumgröße, Substratvolumen und Bewässerungsregime	22
1.5 Lebenserwartung und deren Konsequenzen für Pflanzung und Pflege	23

25

2 | Was ist bei der Planung von Bäumen in Pflanzgefäßen zu beachten?

2.1 Proportion und Form	26
2.2 Wand	27
2.3 Wasserreservoir	28
2.4 Standsicherheit	28
2.5 Geeignete Baumarten für Pflanzgefäße	30

33

3 | Welche Ökosystemleistungen können Bäume in Pflanzgefäßen erbringen?

3.1 Überblick der Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen	34
3.2 Klimatische Wirkung von Bäumen in Pflanzgefäßen	35
3.3 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Platane	36
3.4 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Winterlinde	38

41

4 | Was sind nachhaltige Planungsstrategien für Bäume in Pflanzgefäßen?

4.1 Zeitabhängige Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen	42
4.2 Zeitabhängige Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen	44

61

Zusammenfassung und Ausblick

64

Weiterführende Information

64

Abkürzungsverzeichnis und Tabellenverzeichnis

65

Abbildungsverzeichnis

66

Literaturverzeichnis



Das Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung

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, Verdunstungskühlung und Schadstoffbindung 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. 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.

Die Teilprojekte des ZSK wurden bis dato vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanziert. Die Koordination des Zentrums ist an der Technischen Universität München verortet und seit 2024 durch diese finanziert. Mehr Informationen bietet der Internetauftritt www.zsk.tum.de.



Einleitung

Strategien für die Anpassungen unserer Städte an den Klimawandel erfordern besonders in dicht bebauten Räumen eine Erhöhung des Vegetationsanteils. Umfassende Untersuchungen über Möglichkeiten zur Klimawandelanpassung in bayerischen Städten wurden durch das Zentrum Stadtnatur und Klimaschutz (ZSK) ausgeführt und liegen mit dem „Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern: Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt (ZSK)“ vor. Hier wurde analysiert, wie sich steigende Temperaturen auf häufige Siedlungstypen in bayerischen Städten auswirken und

wie ihnen zu begegnen ist. Der Bericht stellt fest, dass „Bäume [...] den größten Einfluss auf das urbane Mikroklima [haben]. Sie kühlen durch Verdunstung und verschatten Höfe, Straßen und Plätze. Sie sind für den Erhalt der Biodiversität von großer Bedeutung. Der Baumbestand in der Stadt soll geschützt werden. Bei Neupflanzungen sollte auf klimatolerante Baumarten geachtet und ausreichend Wurzelraum eingeplant werden.“ [1]

Die Sicherung und Mehrung des Stadtgrüns steht jedoch häufig im Konflikt mit einem hohen Bevölkerungswachstum in Ballungsräumen und der daraus

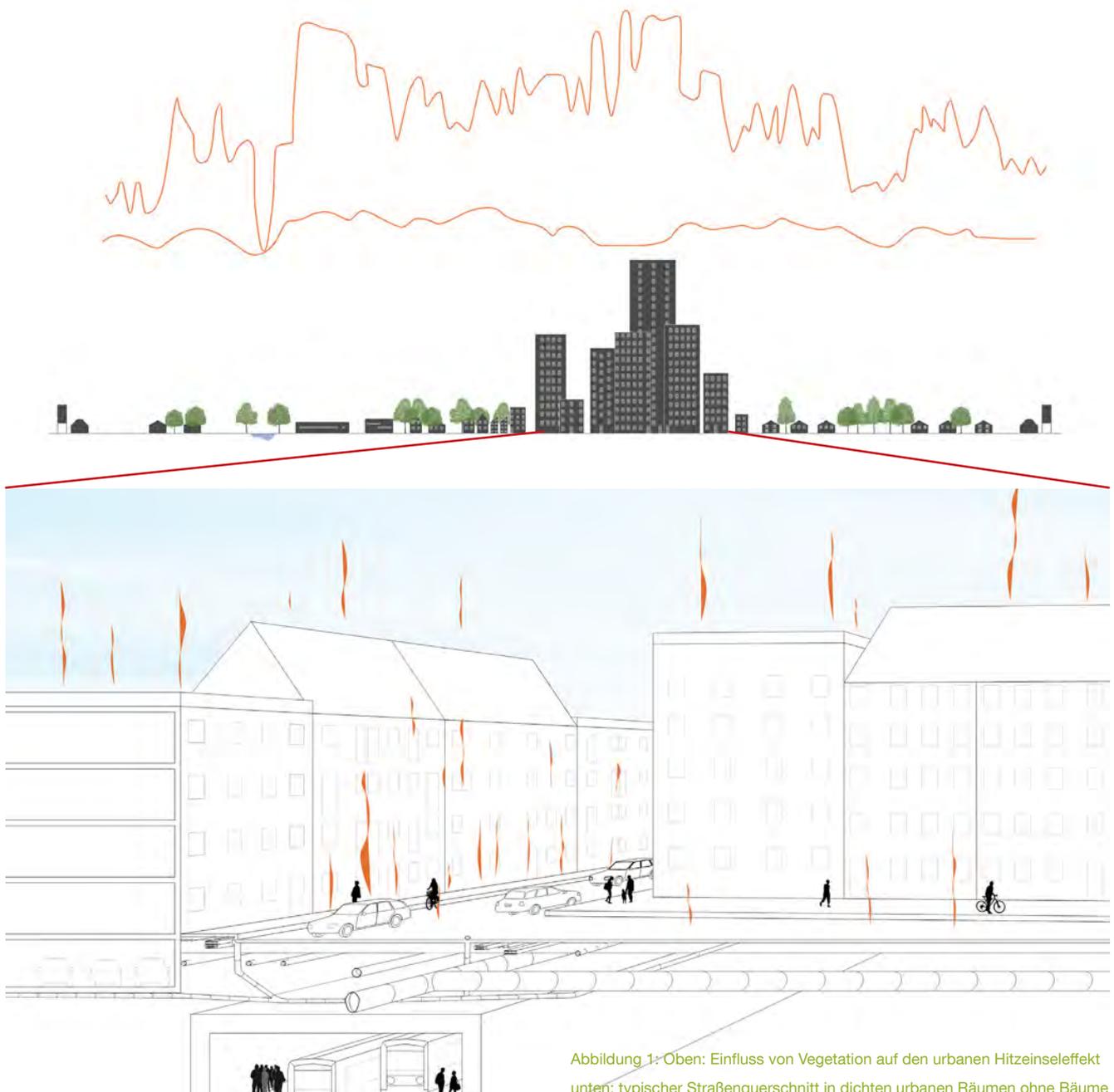


Abbildung 1: Oben: Einfluss von Vegetation auf den urbanen Hitzeinseleffekt unten: typischer Straßenquerschnitt in dichten urbanen Räumen ohne Bäume

resultierenden Nachverdichtung bzw. einer hochverdichteten Bauweise [2]. Anstatt mehr Grün sind oft monotone, von harten und versiegelten Oberflächen dominierte Freiräume die Folge [3], was in einer Verstärkung des urbanen Wärmeinseleffekts resultiert [4]. Vor dem Hintergrund, dass durch den Klimawandel mit einer weiteren Zunahme von Hitzetagen zu rechnen ist, führt dies zu einer deutlichen Verstärkung des ohnehin schon hohen sommerlichen Hitzestresses in Städten [5]. In Kombination mit unzureichendem Kontakt zur Natur kommt es in der Folge zu einer Abnahme der Lebensqualität, mit negativen Auswirkungen auf die Gesundheit und das menschliche Wohlbefinden [1,6,7]. Über die individuelle Betroffenheit hinaus ist dies von hoher gesellschaftlicher Relevanz, da sich eine hohe Lebensqualität auch direkt auf die sozio-ökonomische Leistung sowie Innovationskraft von Städten auswirkt [6]. Daher ist die erfolgreiche Anpassung von Städten an den Klimawandel durch mehr Grün gerade auch im Kontext von Nachverdichtung äußerst wichtig.

Durch eine weitsichtige Stadtplanung, die frühzeitig und umfassend die Belange des Stadtgrüns und die Klimawandelanpassung berücksichtigt, lassen sich zwar oft Lösungen für die Sicherung und Erhöhung des Stadtgrüns erreichen, eine wesentliche Herausforderung ist jedoch die Neupflanzung von Bäumen [7–9]. Denn häufig führen starke Flächenversiegelung, eine intensive Nutzung der Freiflächen sowie unterirdische technische Infrastrukturen wie Leitungen, Tiefgaragen oder U-Bahntrassen dazu, dass kein adäquater Wurzelraum zur Verfügung steht bzw. geschaffen werden kann [1,10]. Unter derartigen Bedingungen sind Baumpflanzungen oft konfliktträchtig (z.B. Gefahr des Ein-

wachsens von Wurzeln in Abwasserleitungen) und die Bäume können sich häufig nicht vital entwickeln [11], was zu einem früheren Absterben und einer deutlich reduzierten mikroklimatischen Leistung führt [2]. Auf Baumpflanzungen wird unter diesen Bedingungen daher leider häufig ganz verzichtet.

Bäume in Pflanzgefäßen

Für die Begrünung von Orten ohne Bodenanschluss bzw. ausreichendem unterirdischen Wurzelraum stellen Bäume in Pflanzgefäßen eine interessante und vielfach erprobte Lösungsmöglichkeit dar, wie Projekte in ganz Europa zeigen [12]. Die dadurch mögliche Ausschöpfung aller Begrünungspotentiale in bislang oft nicht berücksichtigten Freiräumen und an bzw. auf Gebäuden kann auf stadtklimatischer Ebene zur Reduzierung des Wärmeinseleffekts beitragen [8]. Die Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen birgt jedoch eine Reihe von Herausforderungen, die es bei der Planung zu beachten gilt: Aufgrund der beschränkten Größe des Pflanzgefäßes können Umweltfaktoren wie Hitze, Trockenheit, Nährstoffverfügbarkeit, Luftverschmutzung oder Vandalismus eine starke Auswirkung auf das Wachstum und die Vitalität des Baumes haben [10,13–16]. Der Aufwand für Pflege und Vegetationstechnik ist für Bäume in Pflanzgefäßen somit höher als von Bäumen im Boden. Zudem ist die Lebenserwartung von Bäumen in Pflanzgefäßen geringer einzuschätzen als die von in den Boden gepflanzte Bäumen [17,18]. Daher müssen zeitliche Aspekte wie die Lebenserwartung des Baumes und des Pflanzgefäßes, die erforderlichen Pflegemaßnahmen und die zu erwartende Ökosystemleistung des Baumes im Pflanzgefäß in der Planung



Abbildung 2: Bäume in Pflanzgefäßen begrünen Straßenraum und Gebäude

berücksichtigt und in ein schlüssiges Gesamtkonzept integriert werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass für die geplante Nutzungszeit die gewünschten Wirkungen tatsächlich erreicht werden.

Der vorliegende Leitfaden zeigt Lösungsansätze für die erfolgreiche Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen auf und soll als Anregung, Orientierung und Handlungsanleitung dienen. Um den genannten Lösungsansatz umzusetzen und die positiven Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen optimal auszuschöpfen, ist es notwendig, die genannten zeitlichen Aspekte (u.a. Wachstum, Absterben von Pflanzenteilen oder ganzen Pflanzen, Wachstumsreaktionen auf Umweltfaktoren wie Wind, Konkurrenz um Licht und Ressourcen, mechanische Verletzungen) in der Planung zu berücksichtigen. Projektanalysen zeigen, dass hier noch starker Aufklärungsbedarf besteht [12]. Auf politischer und kommunaler Ebene müssen nicht nur die Potentiale von Bäumen in Pflanzgefäßen aufgezeigt, sondern auch Ängste und Befürchtungen bezüglich Umsetzung, Kosten und Lebenserwartung genommen werden.

In einem Pflanzgefäß erreicht ein Baum selten seine natürliche Größe, da die Begrenzung des Wurzelraums sich auf das maximal mögliche Wachstum des Baumes auswirkt [19]. Die Auswahl von adäquaten Baumarten, passenden Pflanzgefäßen und einer kontinuierlichen sowie verlässlichen Pflege hat großen Einfluss auf das Wachstum, die Ökosystemleistung und Lebenserwartung von Bäumen in Pflanzgefäßen. Daher müssen die Wachstumsdynamiken von Bäumen im Entwurf stärker von Beginn an in den Fokus rücken. Oft wird hier noch

nach dem „Prinzip Hoffnung“ gehandelt. Dies reicht jedoch in den seltensten Fällen aus, um die Ziele innerhalb des angestrebten Projektzeitraums zu erreichen, besonders wenn die positiven Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen im Zentrum des Interesses stehen [12].

Schlüssige Konzepte für Begrünungen mit Bäumen in Pflanzgefäßen bauen daher immer auf den Faktor Zeit als einen zentralen Entwurfparameter auf und sind so zu entwickeln, dass die oben genannten Aspekte berücksichtigt und die beteiligten Akteur:innen (Landschaftsarchitekt:in, Architekt:in, Bauherr:in, Baumschule, Gärtner:in, Pflanzgefäßhersteller) mit ihren jeweiligen Aufgaben (Planung, Bau, Vorkultur, Produktion, Pflanzung, Pflege) einbezogen werden. Für die Kommunikation des Konzeptes mit allen Projektbeteiligten wurden im vorliegenden Projekt grafische Darstellungen entwickelt, die alle zeitlichen Abläufen umfassen und die geplanten Projektschritte sowie die dazu nötigen Maßnahmen der beteiligten Akteur:innen einbeziehen. Grafische Darstellung von zeitlichen Aspekten eines Projektes werden zum Teil schon in Planungsbüros angewandt [20]. Dazu zählen u.a. Abfolgen von Lageplänen, Zeitachsen, Schnittabfolgen oder Zeitdiagramme.

Ist im gesamten Projektverlauf die klare und verständliche Kommunikation der Ziele und des Entwurfskonzeptes mit allen zu berücksichtigenden zeitlichen Aspekten gewährleistet, können Bäume in Pflanzgefäßen erfolgreich als alternative Begrünungslösung nicht nur wegen ihrer Ästhetik, sondern auch wegen ihres ökologischen und ökonomischen Wertes verwendet werden.

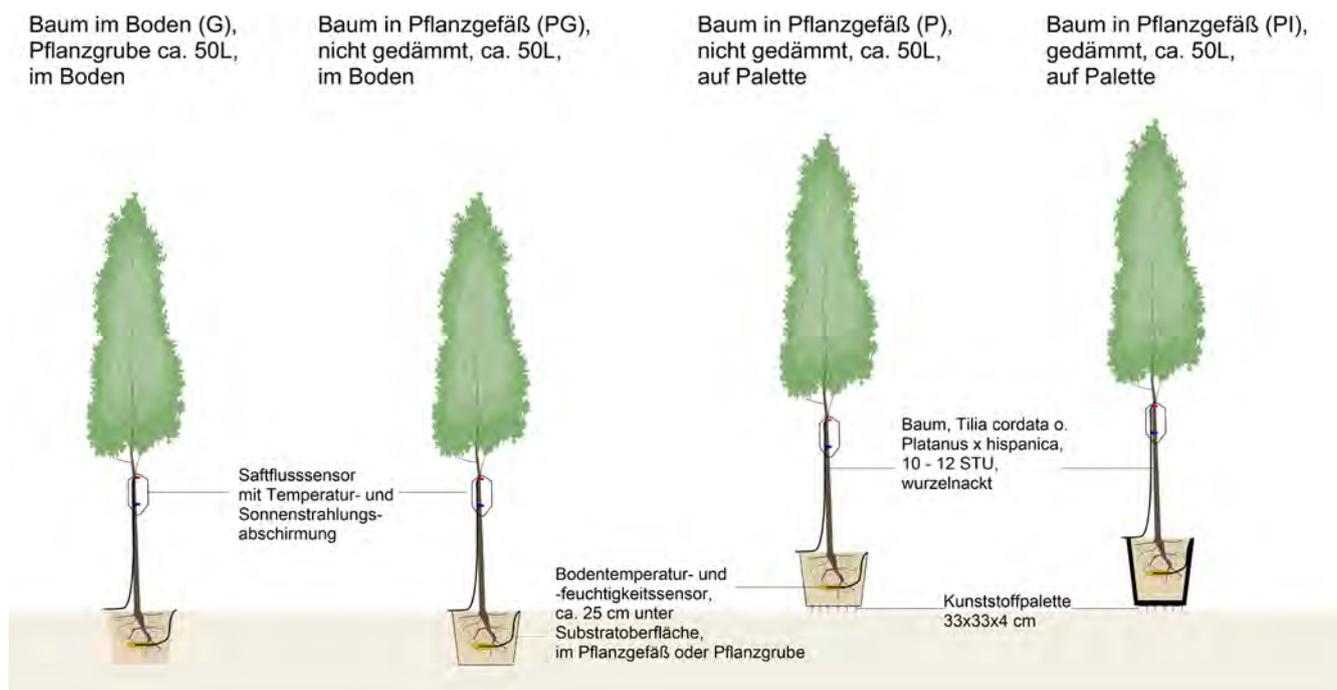


Abbildung 3: Pflanzvarianten der Versuchsreihe 1 des Wachstumsversuchs am Gewächshauslaborzentrum in Dürnast

Vorgehensweise

Der vorliegende Leitfaden ist ein Ergebnis des Teilprojektes „Bäume in Pflanzgefäßen als stadtklimatisch wirksame Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel“ des ZSK, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, in dem ein Forscherteam der TU München die Wachstumsdynamik und die Ökosystemleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen untersucht hat. Neben den Erkenntnissen aus Literaturstudien, Experteninterviews, Fall- und Entwurfstudien, basieren die hier vorgestellten Ergebnisse maßgeblich auf Messungen und Beobachtungen einer eigens für das Vorhaben am Gewächshauslaborzentrum Dürnast der TUM eingerichteten Versuchsfläche. Auf dem Versuchsfeld mit einer Größe von 34 auf 28 Metern wurden in zwei Versuchsreihen 114 Bäume in unterschiedliche Pflanzgefäße gepflanzt und 32 als Kontrollen im Boden. In Versuchsreihe 1 wurden an 64 Platanen und 64 Winterlinden in vier Pflanzvarianten die Einflüsse von Wurzelraumtemperatur und Bewässerungsregime auf das Wachstum und die Ökosystemleistung untersucht (Abbildung 3). Dazu wurde die eine Hälfte der Bäume optimal bewässert und die andere durch reduzierte Bewässerung in Trockenstress versetzt. In Versuchsreihe 2 wurde an 18 Platanen in drei Pflanzvarianten zusätzlich der Einfluss von integrierten Wasserreservoirs in den Pflanzgefäßen auf die Wasserversorgung und auf das Wachstum untersucht (Abbildung 4). Gemessen wurde in beiden Versuchsreihen Brusthöhendurchmesserzuwachs, Kronenprojektionsfläche, Blattanzahl, Blattverdunstungsrate, Kühlleistung durch Verdunstung, Tempera-

tur im Wurzelraum und volumetrischer Wassergehalt im Substrat.

Als Baumarten wurden Winterlinde (*Tilia cordata*) und Platane (*Platanus x hispanica*) gewählt. Winterlinde und Platane sind Baumarten, die häufig in mitteleuropäischen Städten gepflanzt werden und nach Roloff [82] im Kontext des Klimawandels als sehr gut geeignet (Platane) bzw. geeignet (Winterlinde) eingeschätzt werden. Gleichzeitig weisen die beiden Baumarten signifikante Unterschiede in Bezug auf Trockenheitstoleranz, Wasserbedarf, Reaktion gegenüber Wassermangel und Wachstumsrate auf. Die Platane ist eine isohydrische Baumart mit einer hohen Trockenheitstoleranz bei gleichzeitig mittlerem Wasserbedarf, während die Winterlinde eine anisohydrische Baumart mit einer mittleren Trockenheitstoleranz und geringen Wasserbedarf ist. Die Platane ist eine schnellwüchsige Baumart, die Winterlinde kann hingegen zu den langsam wachsenden Baumarten gezählt werden. Im vorliegenden Leitfaden werden die beiden untersuchten Baumarten daher stellvertretend für schnellwachsende bzw. langsamwachsende Baumarten sowie für trockenheitstolerante bzw. weniger trockenheitstolerante Baumarten dargestellt.

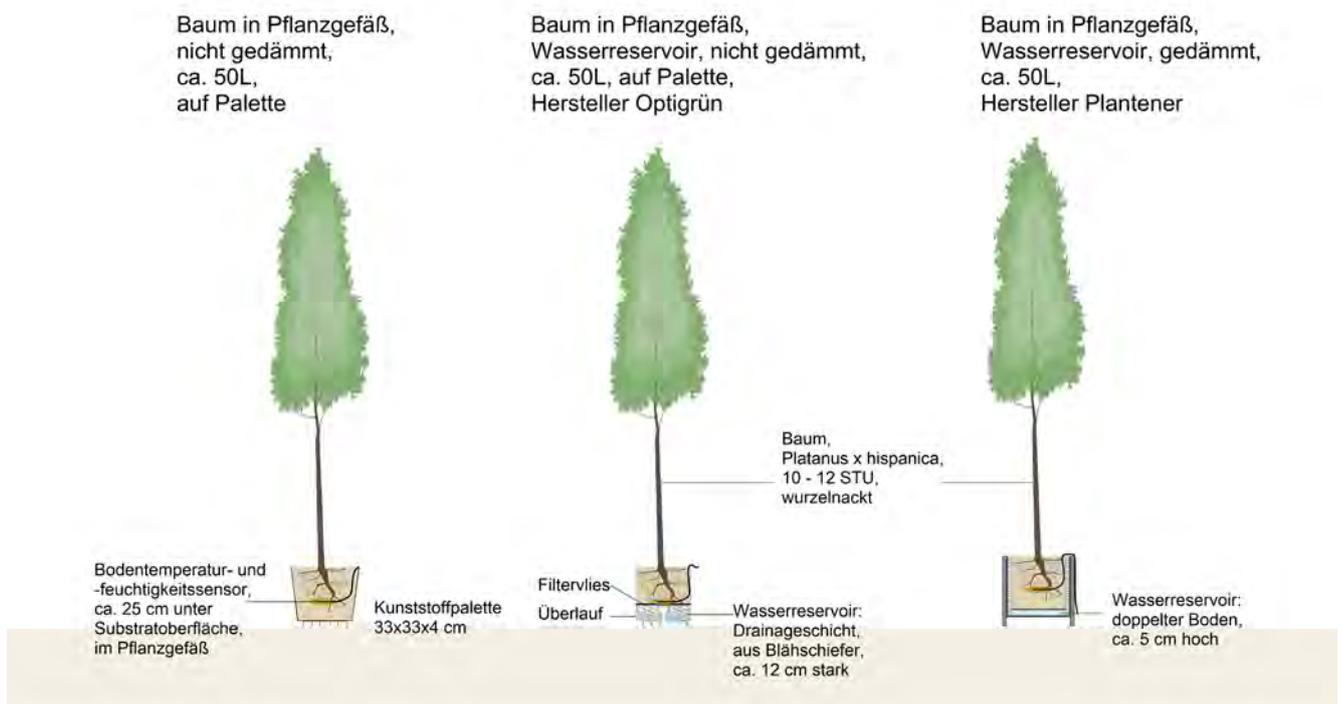


Abbildung 4: Pflanzvarianten der Versuchsreihe 2 des Wachstumsversuchs am Gewächshauslaborzentrum in Dürnast

Adressat und Aufbau des Leitfadens

Der Leitfaden richtet sich in erster Linie an Planungsbüros aus den Bereichen Landschaftsarchitektur, Architektur und Stadtplanung sowie an Grün- und Stadtplanungsämter und an politische Vertreter:innen auf Stadt- und Gemeindeebene, um einen Impuls zu geben, die Begrünungspotentiale von Bäumen in Pflanzgefäßen zu erkennen und zu nutzen. Angesprochen werden auch Baumschulen, der Hochbau, das Wassermanagement und die Stadtklimatologie.

Im Kapitel „Wie entwickeln sich Bäume in Pflanzgefäßen und was sind die wichtigsten Wachstumsfaktoren?“ wird auf die wichtigsten Wachstumsfaktoren eingegangen und es wird aufgezeigt, wie diese die Wachstumsdynamik von Bäumen in Pflanzgefäßen beeinflussen. Darauf aufbauend werden Faustformeln für die Dimensionierung von Pflanzgefäßen und zur Abschätzung der Lebenserwartung von Bäumen in Pflanzgefäßen vorgestellt und Hinweise für Pflanzung und Pflege gegeben.

Das Kapitel „Was ist bei der Planung von Bäumen in Pflanzgefäßen zu beachten?“ zeigt auf, welchen Einfluss die Beschaffenheit eines Pflanzgefäßes auf die Entwicklung eines Baumes hat. Außerdem werden in diesem Kapitel Hinweise zur Standsicherheit von Bäumen in Pflanzgefäßen und geeigneten Baumarten gegeben.

Im Kapitel „Welche Ökosystemleistungen können Bäume in Pflanzgefäße erbringen?“ wird Anwender:innen aufgezeigt, welche mikroklimatischen Kühlleistungen Bäume in Pflanzgefäßen erbringen können. Zudem kann die dargestellte Simulation des Baumwachstums und der damit verbundenen Ökosystemleistung als Hilfestellung dienen, um abzuschätzen, ob die gewünschten Effekte in ihrer aktuellen Planung erreicht werden.

Das Kapitel „Was sind nachhaltige Planungsstrategien für Bäume in Pflanzgefäßen?“ stellt eine auf dem Faktor Zeit basierende Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen vor, die alle wichtigen Einflussfaktoren in einer Entscheidungshilfe für die Wahl des passenden zeitabhängigen Entwurfstyps bündelt. Die einzelnen Typen, die unterschiedliche Projektanforderungen erfüllen, werden detailliert vorgestellt. Zusammenfassung und Ausblick fassen die wesentlichen Erkenntnisse in einer Handlungsaufforderung zusammen.



Bäume in Pflanzgefäßen auf der Versuchsfläche
am Gewächshauslaborzentrum in Dürnast (Foto: Christoph Fleckenstein)



Bosco Verticale, Mailand (Foto: Haaijk, 2019)



**Wie entwickeln
sich Bäume in
Pflanzgefäßen
und was sind
die wichtigsten
Wachstums-
faktoren?**

1.1 Allgemeine Grundlagen

Wasser ist einer der wichtigsten Wachstumsfaktoren von Bäumen, denn ohne Wasser kann kein Baum überleben [15,21]. Begrenzter oder gar unzureichender Wurzelraum schränkt die Wasserverfügbarkeit für Bäume stark ein und erhöht damit die Wahrscheinlichkeit von Trockenstress [11]. Trockenstress führt zu reduziertem Wachstum und verringert die Überlebenschancen eines Baumes [14,15,22-25]. Aber auch zu viel Wasser kann zu Beeinträchtigungen des Wachstums und der Vitalität führen, da Staunässe anaerobe Bedingungen in der Wurzelzone schafft und Wurzelfäule auslösen kann [21,26,27]. Dies verdeutlicht, dass das Bewässerungsregime einen großen Einfluss auf das Wachstum und die Vitalität hat [26-32]. Bei Bäumen in Pflanzgefäßen spielt die Bewässerung eine zentrale Rolle, da aufgrund des geringen Substratvolumens die Risiken von Trockenstress und Staunässe viel höher einzuschätzen sind als bei im Boden wachsenden Bäumen [11,18,26,33]. Die Wasserversorgung beeinflusst auch die Evapotranspirationskapazität der Bäume, denn wenn mehr Wasser aufgenommen werden kann, kann auch mehr verdunstet werden [11,34,35]. Der städtische Wärmeineffekt fördert die Verdunstung der Bäume durch erhöhte Temperaturen und damit den täglichen Wasserverbrauch eines Baumes [11,18,31,36,37].

Allgemein gilt, dass sich Düngung positiv auf Wachstum und Vitalität auswirken, wobei jedoch eine gute Nährstoffversorgung zu einer Reduktion des Wurzelwachstums führen kann [38, 39,40], da der Baum nicht darauf angewiesen ist, neue Nährstoffquellen über ein größeres Wurzelsystem zu erschließen. Für Bäume in Pflanzgefäßen gilt der Grundsatz: Je größer das Gefäß ist, desto mehr Nährstoffe und Wasser stehen zur Verfügung, und desto stärker kann der Baum wachsen [41]. Anders als bei im Boden wachsenden Bäumen, die meist auf natürlichem Wege ausreichend mit Nährstoffen versorgt sind, ist bei Bäumen in Pflanzgefäßen auf eine ausreichende Nährstoffversorgung, z.B. durch Depotdünger, zu achten.

Die Wahl des Substrats ist für das Wachstum und die Vitalität der Bäume besonders wichtig, da nur durch ein gesundes Wurzelwerk eine ausreichende Wasser- und Nährstoffaufnahme möglich ist. Eine Verdichtung des Substrats in der Wurzelzone führt zu einer unzureichenden Wasserinfiltration und unterbricht die Sauerstoffversorgung, so dass die Wasser- und Nährstoffaufnahme aufgrund einer beeinträchtigten Wurzelatmung reduziert wird [15,40,42,43]. Daher sollten Baumsubstrate für Pflanzgefäße strukturell stabil sein und möglichst viele luftführende Poren aufweisen, da die Versorgung des Baumes mit Sauerstoff, Was-

ser und Nährstoffen in groben Poren am besten ist [21,25,42]. Entsprechend sollten Substrate verwendet werden, die eine ausgewogene Mischung aus groben und feinen Partikeln aufweisen [44]. Damit kann sichergestellt werden, dass einerseits durch eine ausreichende Drainage keine Staunässe entsteht [21,25,42] und andererseits eine gute Wasserspeicherkapazität gegeben ist, damit Wasser im Substrat gespeichert und dem Baum zur Verfügung gestellt werden kann [11]. Bäume passen ihr Wurzelwachstum an die Bodenbedingungen an, indem sie bevorzugt dort wachsen, wo sie ausreichend Wasser, Sauerstoff und Nährstoffe finden [21,25,39,44,45]. Deformierte Wurzeln (Ringwurzeln, Knickwurzeln), insbesondere bei Setzlingen, können in ihrer Nährstoffaufnahme beeinträchtigt sein und somit trotz ausreichender Nährstoffverfügbarkeit nicht genügend Nährstoffe aufnehmen [46,47], was die Vitalität des Baumes verringert [29,30,48,49]. Eine gesunde Wurzelarchitektur ist für die Vitalität eines Baumes wichtiger als die Wurzelmasse, da sich diese besonders auf das Wachstum auswirkt [48,50-52].

Werden Bäume in Pflanzgefäße gepflanzt - wie bei jeder Baumpflanzung - sollte ein Wurzelverjüngungsschnitt durchgeführt werden, um neues Wurzelwachstum zu stimulieren [41,50,52-56]. Der Verlust an Wurzelmasse sollte durch einen Kronenschnitt kompensiert werden, um das Gleichgewicht zwischen Wasseraufnahme und Verdunstung wiederherzustellen [21].

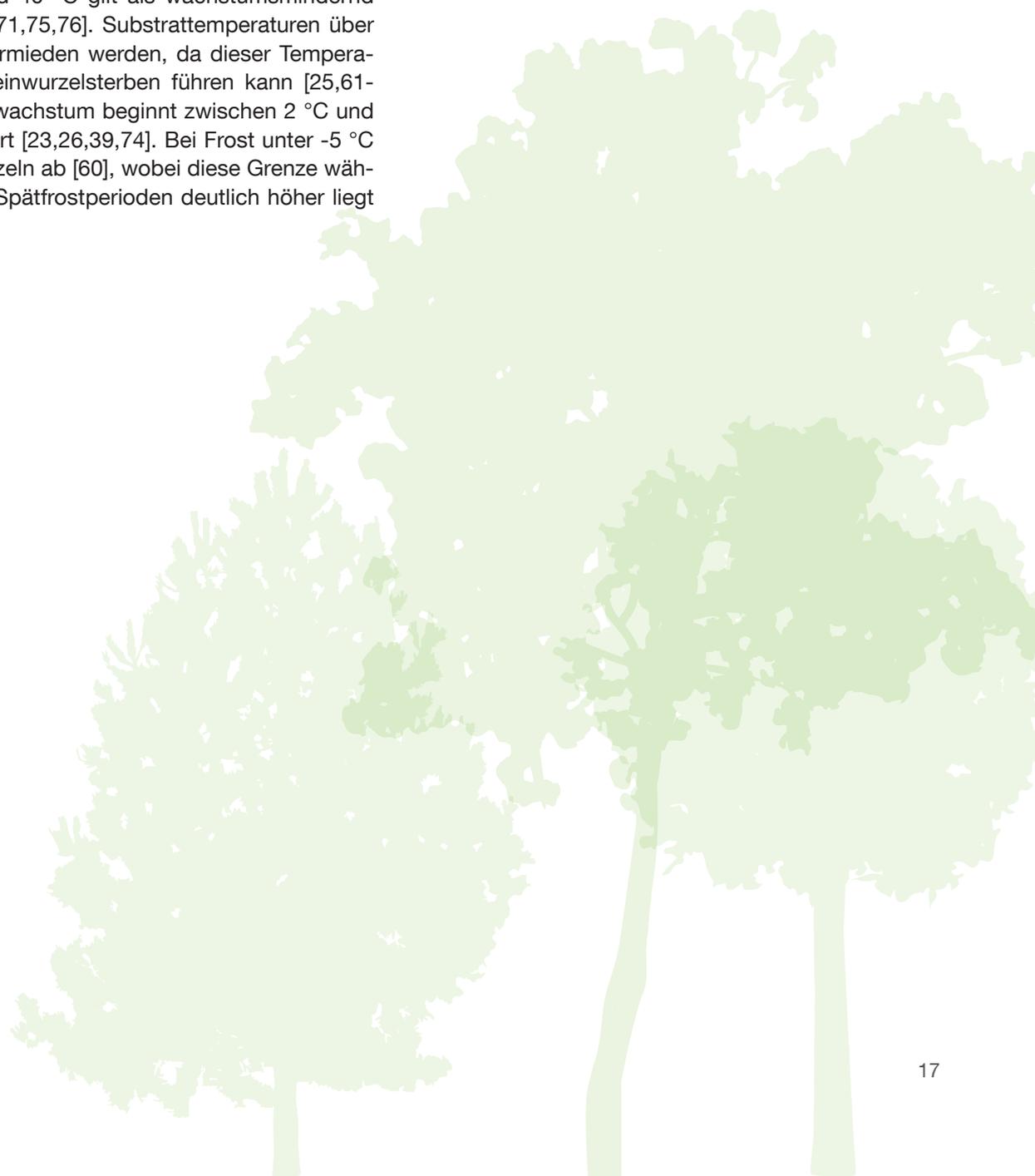
Die Wasseraufnahme hängt von der Bildung neuer Wurzeln ab, da nur durch das Wurzelwachstum neue Feinwurzeln entstehen, die für die Wasseraufnahme verantwortlich sind [30]. Theoretisch bedeutet dies, dass der Baum absterben wird, wenn im Pflanzgefäß kein Platz mehr für das Wachstum neuer Wurzeln vorhanden ist. Es wurden jedoch noch keine Studien veröffentlicht, die untersucht haben, wie stark die Wurzelverformungen sein müssen, damit die langfristige Gesundheit und Leistung eines Baumes beeinträchtigt wird [48].

Das bedeutet, dass bei künstlicher Bewässerung und Düngung in Kombination mit einem geeigneten Substrat der begrenzte Wurzelraum in einem Pflanzgefäß bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden kann. Trotz der Kompensation wird ein Baum im Pflanzgefäß stets kleiner bleiben als ein Baum im Boden, sofern der für die Wuchsgröße benötigte Wurzelraum deutlich höher ist als der im Pflanzgefäß zur Verfügung stehende Wurzelraum.

Die Temperatur im Wurzelraum hat einen großen Einfluss auf das Wurzelwachstum [57-59]. Sowohl Frost als auch Hitze können die Wurzeln schädigen oder sogar zum Wurzeltod führen [25,60-65]. Bäume in Pflanzgefäßen sind aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung auf die Gefäßwand [24,66,67] und des

geringen Substratvolumens [33,47,60,61,68] besonders von hohen Wurzelzonentemperaturen betroffen. Der hohe Versiegelungsgrad in städtischen Gebieten kann die Temperaturbelastung erhöhen [43,69-71]. Die chronische Exposition der Wurzelzone gegenüber hohen Wurzelzonentemperaturen kann die Lebensdauer eines Baumes aufgrund von Wurzelschäden verkürzen [61,71]. Zu den Ursachen gehören Sauerstoffmangel aufgrund erhöhter Wurzelatmung [21,25,61,72], permanenter Trockenstress durch übermäßige Verdunstung trotz ausreichender Bewässerung [61], verringerte Nährstoffaufnahme [34,43,61,72] und Feinwurzelsterben [34,61]. In den Sommermonaten kann die direkte Sonneneinstrahlung die Temperatur der Wurzelzone in Pflanzgefäßen leicht auf über 40 °C ansteigen lassen [61,68,73]. Die optimale Temperatur in der Wurzelzone liegt je nach Art zwischen 15 und 32 °C [25,34,43,58,62-64,74]. Der Temperaturbereich zwischen 30 und 40 °C gilt als wachstumsmindernd [25,34,43,62,68,71,75,76]. Substrattemperaturen über 40 °C sollten vermieden werden, da dieser Temperaturbereich zu Feinwurzelsterben führen kann [25,61-65]. Das Wurzelwachstum beginnt zwischen 2 °C und 11 °C, je nach Art [23,26,39,74]. Bei Frost unter -5 °C sterben Feinwurzeln ab [60], wobei diese Grenze während Früh- und Spätfrostperioden deutlich höher liegt [21,60,77].

Der Einfluss der Temperatur im Wurzelraum ist auch von der Himmelsrichtung abhängig. Daher sollte die Ausrichtung von Baum und Pflanzgefäß bei einer Versetzung gleichbleiben, da sich die Wurzelstruktur an unterschiedliche Temperaturzonen im Pflanzgefäß anpasst, die durch die direkte Sonneneinstrahlung auf die Wand des Pflanzgefäßes entstehen. Der gleiche Effekt gilt für die Kronenstruktur. Das Pflanzgefäß sollte daher über klare Markierungen verfügen für die korrekte Ausrichtung von Baum und Pflanzgefäß nach einer Neupositionierung.



1.2 Wachstum von Bäumen in Pflanzgefäßen

Bäume in Pflanzgefäßen sind in ihrem Wachstum deutlich eingeschränkter als Bäume, die im offenen Boden wachsen, da ihnen nur ein stark begrenzter Wurzelraum zur Verfügung steht. Das Pflanzgefäß wirkt sich nicht nur auf die maximal mögliche Wuchsgröße des Baumes, sondern auch auf seine Wuchsdynamik aus. Nähert sich der Baum in seinem Wachstum den Grenzen des Pflanzgefäßes, nimmt die Wuchsdynamik stetig ab und kommt quasi anschließend zum Stillstand [19,31,33,41,67,78-80].

Für die Darstellung der Wachstumsdynamik von Bäumen spielt der Stammdurchmesser bzw. die Durchmesserzunahme, gemessen auf einer Höhe von 1,3 Metern, eine wichtige Rolle. Der Stammdurchmesser steht in engem Zusammenhang mit der Baumhöhe, der Kronenschirmfläche und dem Kronenvolumen und reflektiert somit Raumbesetzung, Ressourcenaufnahme und Zuwachspotenzial von Bäumen [81] und ermöglicht daher wichtige Einblicke in die Wachstumsdynamik.

In unserer Versuchsfläche wurde der Stammdurchmesser kontinuierlich für jeden Baum vermessen. Im Folgenden präsentieren wir die Ergebnisse zum Gesamtdurchmesserzuwachs für die Baumarten Platane und Winterlinde in drei Pflanzgefäßvarianten (Pflanzgefäß im Boden (PG), Pflanzgefäß ohne Wärmedämmung (P), Pflanzgefäß mit Wärmedämmung (PI)) und unter zwei Bewässerungsbedingungen (optimale und reduzierte Bewässerung) im Vergleich zu Pflanzungen

im Boden (G). Die Daten umfassen den Durchmesser seit Beginn des Experiments im Jahr 2020 bis zum Versuchsende im Jahr 2023 (Tabelle 1). Zusätzlich zeigen wir den Wachstumsverlauf des Stammdurchmessers über den gesamten Versuchszeitraum (Abbildung 5). Im Vergleich zu den Pflanzgefäßvarianten zeigten die Kontrollvarianten im Boden bei der Platane einen bis zu 5-mal größeren Durchmesser, während er bei der Winterlinde bis zu 1,5-mal größer war.

Der Verlauf des Durchmesserwachstums (Abbildung 5) seit der Pflanzung im Jahr 2020 zeigt einen anfänglichen Anstieg bei allen Pflanzvarianten im ersten und zweiten Wachstumsjahr (20/21). Jedoch verzeichnet die Kurve nach 2021 einen rückläufigen Trend des Durchmesserzuwachses in den drei Pflanzgefäßvarianten, wobei dieser Rückgang bei den Platanen deutlicher ausgeprägt ist als bei den Winterlinden. Dies legt nahe, dass die Platane aufgrund ihres stärkeren Wachstums im Vergleich zur Winterlinde früher den verfügbaren Wurzelraum im Pflanzgefäß durchwurzelt hat und somit auch früher in ihrem weiteren Wachstum gehemmt wird. Bei der Winterlinde tritt die gemessene Reduktion im Wachstum in ähnlich ausgeprägter Form erst ein Jahr später auf.

Die gemessenen Daten zeigen somit deutlich auf, dass der begrenzte Wurzelraum entscheidenden Einfluss auf das Baumwachstum hat. Bewässerung und Bodentemperatur beeinflussten bei diesen Versuchen nur die Stärke des Wachstumstrends.

Entwicklung des jährlichen Stammdurchmesserzuwachses für Platane und Winterlinde (in mm)

Baumart	Pflanzgefäß	Bewässerung	2020	2021	2022	2023	Gesamt
Platane	Im Boden	optimal	7,3	19,6	21,1	24,4	72,3
Platane	Pflanzgefäß im Boden	optimal	3,8	9,2	10,0	9,7	32,7
Platane	Pflanzgefäß nicht gedämmt	optimal	3,9	6,7	5,8	3,9	20,4
Platane	Pflanzgefäß gedämmt	optimal	4,4	6,9	5,7	5,1	22,1
Platane	im Boden	trocken	8,1	20,6	18,9	23,9	71,5
Platane	Pflanzgefäß im Boden	trocken	3,7	7,9	6,6	4,3	22,4
Platane	Pflanzgefäß nicht gedämmt	trocken	4,2	5,9	2,9	1,8	14,8
Platane	Pflanzgefäß gedämmt	trocken	4,6	4,8	3,5	1,4	14,3
Winterlinde	im Boden	optimal	1,8	8,3	10,2	13,3	33,5
Winterlinde	Pflanzgefäß im Boden	optimal	1,6	8,7	8,7	5,8	24,7
Winterlinde	Pflanzgefäß nicht gedämmt	optimal	3,6	9,9	8,8	5,1	27,4
Winterlinde	Pflanzgefäß gedämmt	optimal	3,8	10,6	6,9	3,0	24,3
Winterlinde	im Boden	trocken	1,1	7,9	8,3	11,0	28,3
Winterlinde	Pflanzgefäß im Boden	trocken	2,5	10,1	6,6	3,0	22,3
Winterlinde	Pflanzgefäß nicht gedämmt	trocken	3,2	8,6	5,0	2,3	19,1
Winterlinde	Pflanzgefäß gedämmt	trocken	3,1	9,4	4,8	2,8	20,1

Tabelle 1: Wachstumsdynamik des Stammdurchmessers über vier Jahre für Platane (*Platanus x hispanica*) und Winterlinde (*Tilia cordata*) in 50 L großen Pflanzgefäßen.

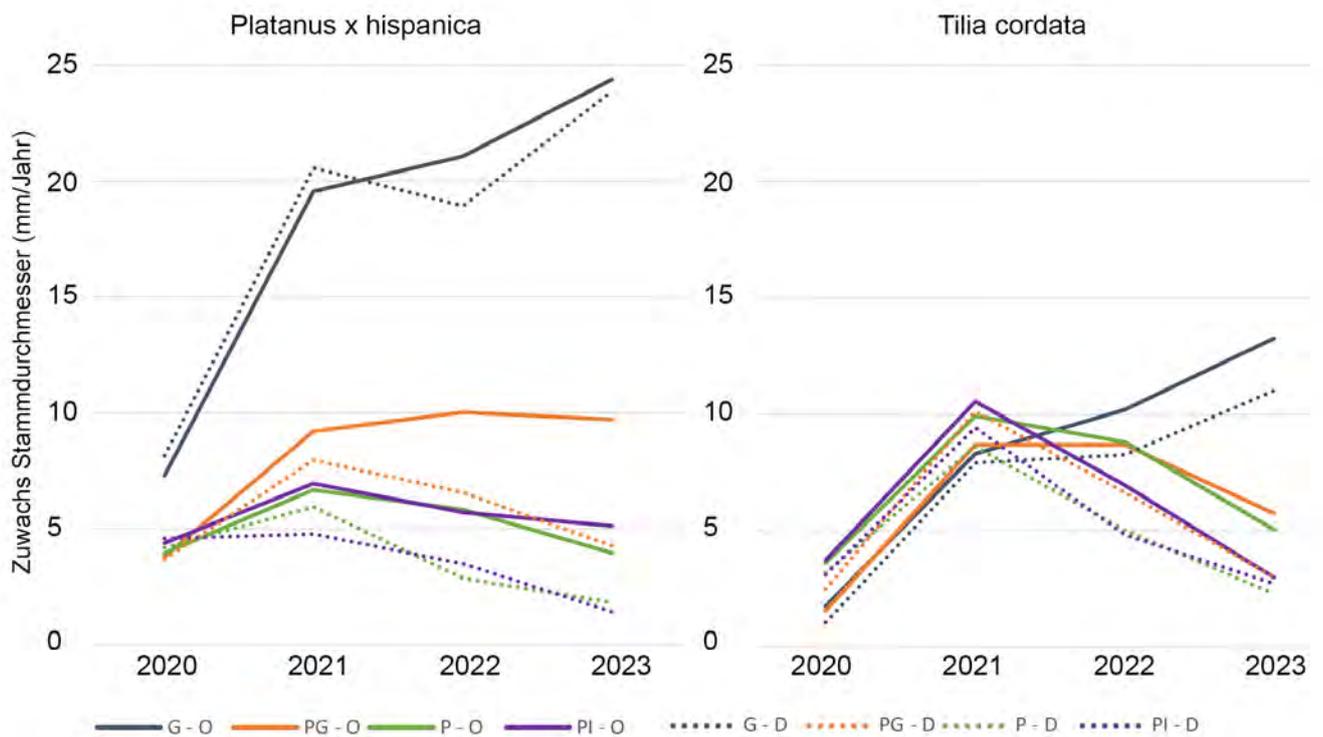


Abbildung 5: Verlauf des jährlichen Stammdurchmesserzuwachses der Versuchsjahre 2020 - 2023 für links: Platane (*Platanus x hispanica*) und rechts: Winterlinde (*Tilia cordata*) sowie die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht gedämmtes Pflanzgefäß (P) und gedämmtes Pflanzgefäß (PI). Die Bewässerungsvarianten sind mit durchgezogener Linie für optimal (O) und gestrichelter Linie für Trockenstress (D) dargestellt.



Abbildung 6: Wachstumsverlauf im vierten Versuchsjahr (2023) von Platane im Pflanzgefäß (oben) und im Boden (unten). Die dargestellten Bäume wurden optimal bewässert.

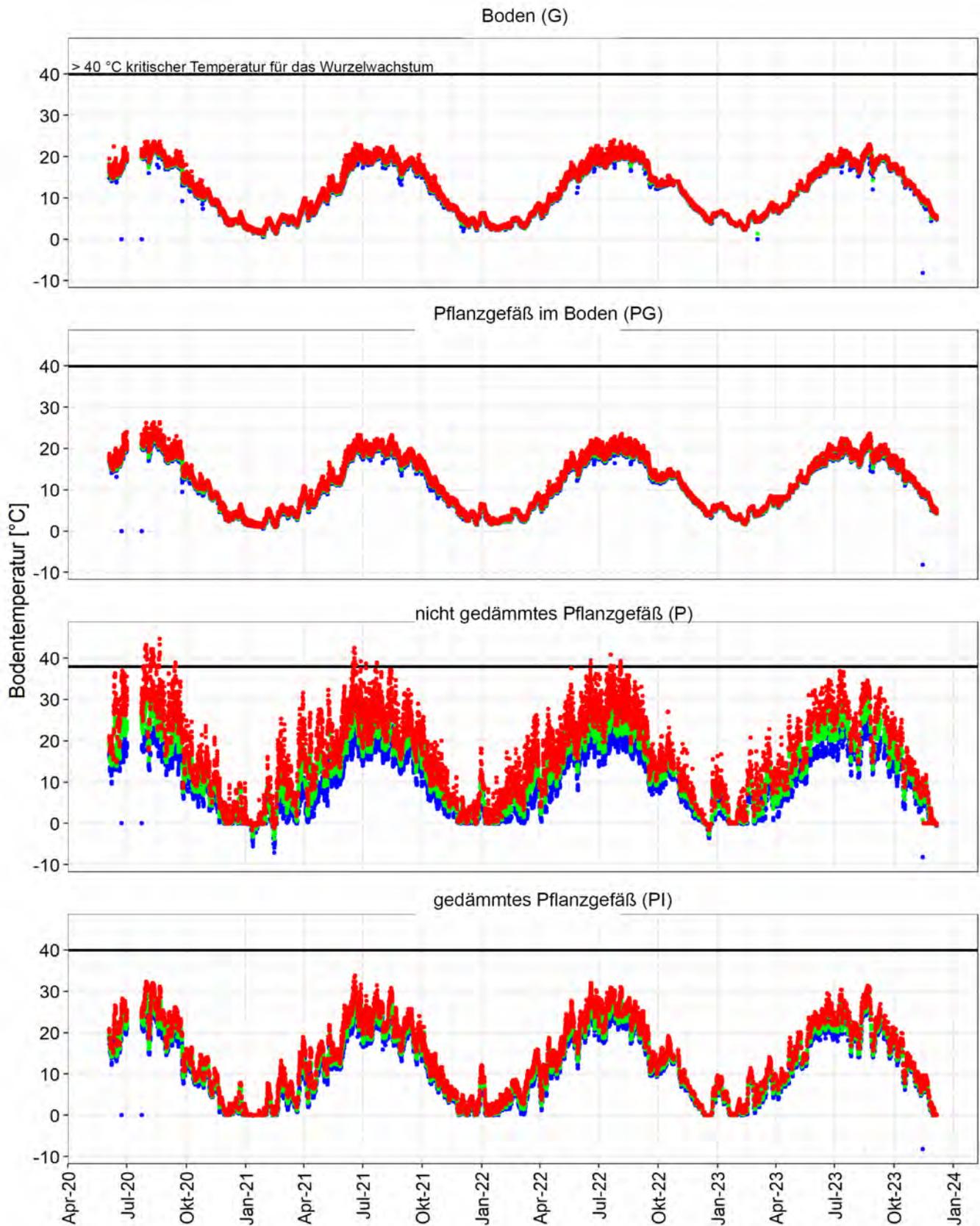


Abbildung 7: Temperaturverlauf im Wurzelraum für die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht gedämmtes Pflanzgefäß (P) und gedämmtes Pflanzgefäß (PI) über den Versuchszeitraum März 2020 - Oktober 2023. Start der Messung war im Mai 2020. Die Messung wurde im November 2023 beendet.

1.3 Reaktion auf Trocken- und Hitzestress

Wie bereits eingangs dargestellt spielt bei Bäumen in Pflanzgefäßen die Bewässerung eine sehr viel zentralere Rolle als bei im Boden wachsenden Bäumen, da durch das kleine Substratvolumen die Risiken für Trockenstress deutlich größer und sehr viel schneller dauerhafte Schädigungen eintreten können [11,18,26,33]. Zudem ist, wie erwähnt, die Temperaturbelastung für den Wurzelbereich deutlich intensiver, da durch direkte Sonneneinstrahlung auf die Gefäßwand [25,33,52] und das geringe Substratvolumen [33,47,60,61,68] weniger Temperaturpuffer bei gleichzeitig höherer Temperatureinwirkung vorhanden ist. Im Sommer kann bei direkter Sonneneinstrahlung die Substrattemperatur leicht über 40 °C und somit in einen wurzelschädigenden Temperaturbereich steigen [61,68,73]. Damit besteht für Bäume in Pflanzgefäßen ein erhöhtes Risiko im Sommer unter Hitzestress zu leiden.

Abbildung 7 zeigt den Temperaturverlauf in den unterschiedlichen Varianten unserer Versuche im Verlauf von vier Vegetationsperioden. Deutlich zu erkennen ist, dass die Temperaturschwankungen im Boden vergleichsweise gering sind und bei ungedämmten Pflanzgefäßen am größten sind. Durch Dämmung der Gefäßwände nehmen die Temperaturschwankungen

deutlich ab, ein Durchfrieren des Substrats wird verhindert und es werden auch an heißen Sommertagen im gesamten Messzeitraum keine Temperaturen über 40 °C gemessen. Die im Boden eingegrabenen Pflanzgefäße zeigen einen Temperaturverlauf der fast 1:1 dem der direkt in den Boden gepflanzten Bäume entspricht. Zu beachten ist, dass die Sensoren immer in der Mitte des Pflanzgefäßes angebracht waren und in den Randbereichen deutlich extremere Temperaturen auftreten. Im Verlauf der Jahre ist zu erkennen, dass bei den ungedämmten Gefäßen in der ersten und zweiten Vegetationsperiode häufiger kritische Temperaturen über 40 °C gemessen wurden, während dies in der dritten und vierten Vegetationsperiode nur noch selten bzw. gar nicht mehr vorkam, was vermutlich mit der Beschattung durch die Baumkronen erklärt werden kann.

Abbildung 8 ist zu entnehmen, dass bei den Winterlinden die Unterschiede im Temperaturverlauf keinen klar erkennbaren Einfluss auf das Dickenwachstum hatten. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei anderen Wachstumsparametern. Ein positiver Effekt der Dämmung auf das Wachstum kann hier also nicht belegt werden, was ggf. damit erklärt werden kann, dass auch bei ungedämmten Pflanzgefäßen kritische Temperaturspitzen über 40 °C nur anfangs auftraten. Bei Platanen zeigt

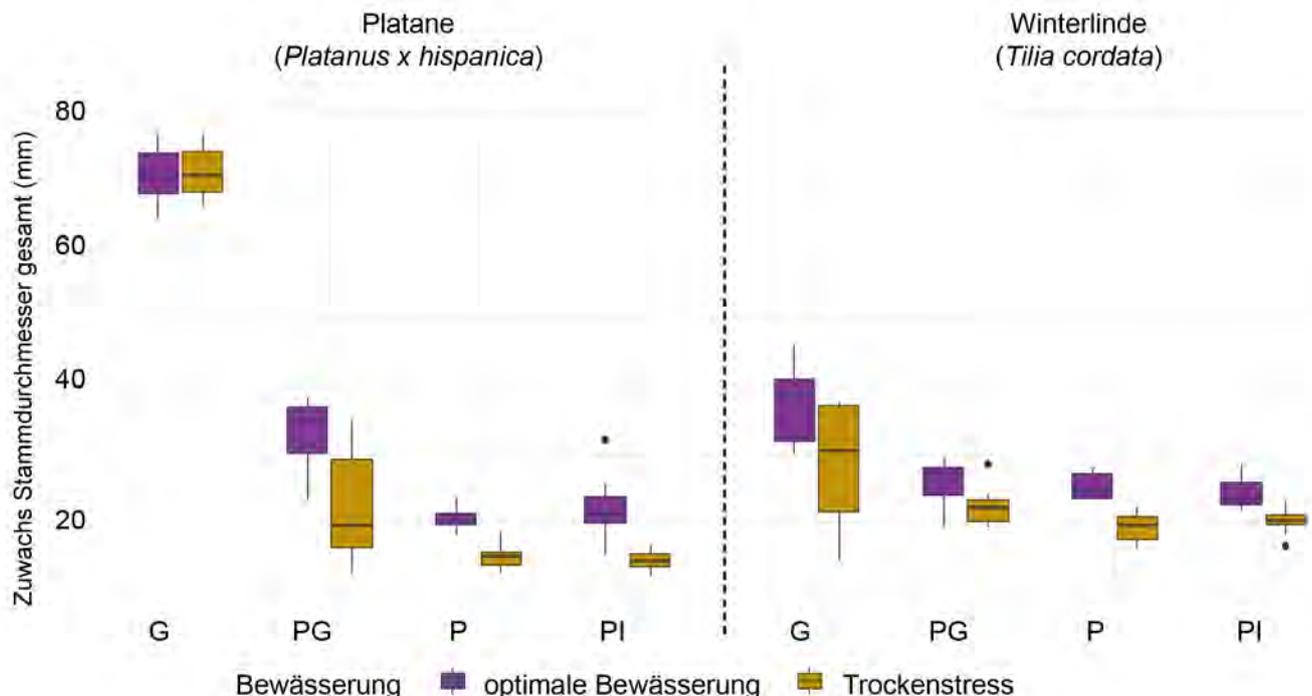


Abbildung 8: Reaktion des Stammdurchmesserzuwachses in mm auf Trockenstress für Platane (links) und Winterlinde (rechts) sowie für die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht gedämmtes Pflanzgefäß (P) und gedämmtes Pflanzgefäß (PI) über den Versuchszeitraum März 2020 - Oktober 2023). Die Bewässerungsvarianten sind in lila für optimal bewässert und in gelb für Trockenstress dargestellt.

sich ein ähnliches Bild, wobei jedoch die Bäume mit eingegrabenen Pflanzgefäßen deutlich kräftiger wachsen. Hier kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass vor allem in den letzten zwei Vegetationsperioden einzelne Wurzeln ggf. ins Erdreich ausgewachsen sind. Bei beiden Arten zeigt sich deutlich, dass die Größe des Wurzelraums (Pflanzgefäß- versus Bodenpflanzung) der entscheidende Wachstumsfaktor ist, wobei diese Tendenz bei Platanen sehr viel ausgeprägter ist. In Abbildung 8 sind darüber hinaus zwei unterschiedliche Bewässerungsregime gegenübergestellt: Eine Optimalbewässerung mit 8L/d und eine „Stressbewässerung“ mit 3L/d. Während diese Reduktion der Wasserversorgung einen erheblichen Einfluss auf das Wachstum aller Bäume in den Pflanzgefäßen hatte, sind im Boden keine (Platane) bzw. eher geringe (Winterlinde) Unterschiede erkennbar. Dies weist darauf hin, dass die Bäume in den Pflanzgefäßen fast vollständig von der Bewässerung abhängig sind, während die Bäume im Boden bereits durch den natürlichen Niederschlag ausreichend mit Wasser versorgt waren.

1.4 Zusammenhang zwischen Baumgröße, Substratvolumen und Bewässerungsregime

Die Größe des Pflanzgefäßes hat einen starken Einfluss auf das maximal mögliche Wachstum des Baumes. Es besteht die Tendenz, dass ein Baum in einem größeren Pflanzgefäß mehr wächst als in einem kleineren [33,41,78-80]. Wenn das Volumen für die Baumgröße ausreichend bemessen ist, führt ein größeres Volumen jedoch nicht zwangsläufig zu einem stärkeren Wachstum [19,31,67].

Lindsey und Bassuk [11] legen zur Berechnung des benötigten Wurzelraums den Wasserbedarf zu Grunde und geben 0,15 – 0,75 m³ Substratvolumen / m² Kronenprojektionsfläche (CPA) bei einer nutzbaren Feldkapazität von 15% und ohne Bewässerung an. Mit Hilfe einer wöchentlichen Bewässerung kann der benötigte Wurzelraum auf 0,08 – 0,15 m³/m² reduziert werden [28,85]. Findet die Bewässerung täglich statt, reichen sogar nur 0,06 m³/m² an Wurzelraum aus [85]. Aus diesen Angaben lassen sich Hinweise für das Verhältnis

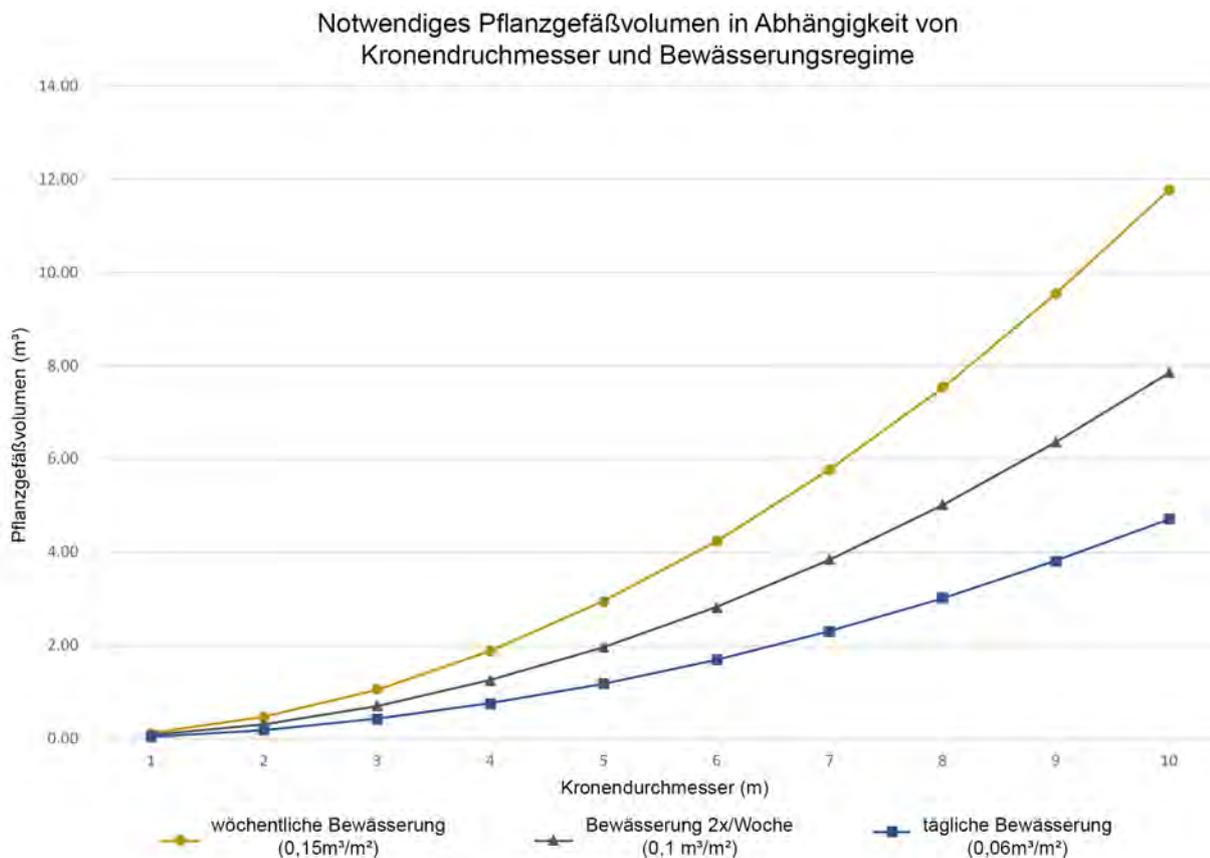


Abbildung 9: Ermittlung des benötigten Pflanzgefäßvolumens in Abhängigkeit von Kronendurchmesser und Bewässerungsregime. Angegeben für eine wöchentliche Bewässerung (gelb), eine tägliche Bewässerung (blau) und zweimal pro Woche (grau).

von Kronenprojektionsfläche bzw. Kronendurchmesser und Substratvolumen in Abhängigkeit vom Bewässerungsregime ableiten. Abbildung 9 zeigt auf, welche Kronendurchmesser nach DeGaetano mit welchem Substratvolumen bei unterschiedlicher Häufigkeit der Bewässerungsgänge erreicht werden können [28,85]. Dabei wird angenommen, dass bei jedem Gießgang der Wasserverlust vollständig kompensiert wird. Verfügbare Pflanzgefäße über einen integrierten Wasserspeicher kann die Bewässerungsfrequenz entsprechend reduziert werden. Diese einfachen Zusammenhänge sind als Abschätzung realistischer Kronendimensionen bei vorgegebenen Pflanzgefäßvolumina zu verstehen. Zu beachten ist hier, dass diese Werte sich auf die Vitalität der Bäume, nicht auf die Standfestigkeit des Pflanzgefäßes beziehen (siehe dazu S. 28)

In unseren eigenen Versuchen wurden bei den verwendeten sehr kleinen Pflanzgefäßen (50L) deutlich kleinere Werte für das Verhältnis zwischen Substratvolumen und Kronenprojektionsfläche gemessen. Diese lagen zum Ende der Messperiode zwischen 0,022 - 0,035 m³/m². Erklären lassen sich diese Werte u.a. durch ein Substrat mit hoher Wasserhaltekapazität, eine hohe Bewässerungsfrequenz (zweimal täglich) und sehr gute Nährstoffversorgung. Derart extreme Verhältnisse können jedoch für die Praxis keinesfalls empfohlen werden, da Lebenserwartung und Robustheit stark negativ beeinflusst werden. In unseren Versuchen wurden diese Verhältnisse bewusst herbeigeführt, um Messungen unter Stressbedingungen zu ermöglichen.

1.5 Lebenserwartung und deren Konsequenzen für Pflanzung und Pflege

Der begrenzte Platz in den Pflanzgefäßen zwingt die Bäume zu einem eingeschränkten Wachstum. Städtische Umweltfaktoren in Form von Hitze, Trockenheit, Nährstoffverfügbarkeit, Luftschadstoffen, Instandhaltung und Vandalismus, deren Einfluss je nach Art der angrenzenden Bebauung stark variieren kann [10,11,82], verschärfen die Auswirkungen des begrenzten Baumwachstums zusätzlich [10,13,15,83]. Bei chronischem Stress beeinträchtigen diese Umweltfaktoren die Vitalität der Bäume zusätzlich und verringern die Lebenserwartung [14,15,83]. Erhaltungsmaßnahmen zur Sicherung der Vitalität und damit zur Verlängerung der Lebenserwartung von Bäumen in Pflanzgefäßen haben daher bei

der Pflege hohe Priorität. Der begrenzte Wurzelraum in Pflanzgefäßen stellt den Baum vor extreme Standortbedingungen und reduziert damit die Reaktionszeit auf Trockenstress oder andere Stressfaktoren [33]. Daraus resultiert ein hoher Pflegeaufwand mit regelmäßiger Kontrolle der Vitalität des Baumes. Ohne automatische Bewässerung ist eine wöchentliche Kontrolle während der Vegetationsperiode erforderlich. Mit einem automatischen Bewässerungssystem ist eine zweiwöchentliche Kontrolle während der Vegetationsperiode erforderlich. Im Rahmen der Kontrolle sollten Wasser, Nährstoffe, Anzeichen von Krankheiten und Schädlingen, Anzeichen von Vandalismus an Baum und Pflanzgefäß sowie die Unversehrtheit des Pflanzgefäßes überprüft werden. Das richtige Verhältnis von Baumgröße und Pflanzgefäß zum Zeitpunkt der Pflanzung ist von besonderer Bedeutung, da ein zu großer Baum nicht genügend Platz und Zeit hat, sich an die Standortbedingungen im Pflanzgefäß anzupassen [26]. In unserem Forschungsprojekt hat sich herauskristallisiert, dass ein gutes Verhältnis von Baum- und Pflanzgefäßgröße zum Zeitpunkt der Pflanzung im Bereich 0,18 m³ Pflanzgefäßvolumen/cm Stammumfang (STU) bis 0,24 m³/cm STU liegt. Bei optimaler Pflege kann die Lebensdauer von Bäumen in Pflanzgefäßen je nach Baumart, Größenverhältnis zwischen Baum und Gefäß zum Zeitpunkt der Pflanzung und der Wahl des Gefäßes bis zu 20 - 40 Jahre betragen. Die weitläufige Meinung, dass Bäume in Pflanzgefäßen nur 10 Jahre überleben können [18], wird von verschiedenen Praxisbeispielen widerlegt, wenn angemessene Pflegemaßnahmen kontinuierlich durchgeführt werden [84]. Wenn der Baum nur vorübergehend im Pflanzgefäß verwendet und anschließend verpflanzt werden soll, wird die maximal mögliche Zeitspanne, die ein Baum im Pflanzgefäß verbleiben kann, bevor die Wurzeldeformationen für eine Verpflanzung zu stark sind, auf 5 bis 10 Jahre geschätzt. Diese Leitlinien beruhen auf den Ergebnissen von Experteninterviews mit denen die umfangreichen praktischen Erfahrungen, die nicht publiziert sind, erschlossen wurden. Ein regelmäßiger Wurzelschnitt scheint eine erfolgreiche Maßnahme zu sein, um die Lebensdauer von Bäumen in Pflanzgefäßen über die erwähnten 20 - 40 Jahre hinaus zu verlängern [84]. Die Haltbarkeit des Pflanzgefäßes kommt ins Spiel, wenn die Lebensdauer des Baumes im Pflanzgefäß 20 - 30 Jahre übersteigt.



Hainbuchen am Haken für die Bepflanzung des KÖ-Bogens II in Düsseldorf (Foto: Ulrike Fischer, 2020)



**Was ist bei der
Planung von
Bäumen in
Pflanzgefäßen
zu beachten?**

Da ein Pflanzgefäß einen stark begrenzten Wurzelraum darstellt, ist es für die Planung wichtig abschätzen zu können, inwiefern sich bestimmte Eigenschaften des Pflanzgefäßes auf das Wurzelwachstum sowie auf das gesamte Baumwachstum und somit auch auf Ökosystemleistungen wie Verschattung oder Verdunstungskühlung auswirken.

Der Einfluss des Gefäßes wird in den meisten Fällen auf Basis der Wurzelentwicklung bewertet. Dabei sind vor allem die Stärke der Wurzeldeformation und die Anzahl an deformierten Wurzeln entscheidende Faktoren (vgl. Abbildung 10 und 11). Dieser Ansatz beruht auf der Erkenntnis, dass Wurzelsysteme mit deformierten Wurzeln (Ringwurzeln, abgeknickte Wurzeln) zu Langzeitbeeinträchtigungen in der Stabilität, Wasser- und Nährstoffversorgung führen und somit das Wachstum und die Vitalität des Baumes reduzieren [29,30,40,48,49,86]. Begrenzter Wurzelraum führt nicht nur zu Wurzeldeformationen, sondern auch zu Wurzelkonkurrenz und kann die Versorgung des Baumes beeinträchtigen [49].

2.1 Proportion und Form

Es ist bekannt, dass die Form und das Breiten-Höhen-Verhältnis eines Pflanzgefäßes erhebliche Auswirkungen auf das Wurzelwachstum und somit auf das Baumwachstum haben. Breite und flache Pflanzgefäßformen wirken sich tendenziell positiv auf das Wachstum und die Vitalität sowie die Wurzelarchitektur aus [30,56,67,78], da Wurzelverformungen in größerer Entfernung zum Stamm geschehen und somit die Gefahr von Strangulation minimiert wird [56]. Die Auswirkung ist jedoch artenabhängig [79]. Breite-Höhe-Verhältnisse zwischen 1:1 und 6:1 gelten allgemein als gut geeignet [67]. Eine luft- und wasserdurchlässige sowie gerippte oder gebuchtete Pflanzgefäßwand hat einen positiven Effekt auf die Vitalität eines Baumes in einem Pflanzgefäß, da es zu keiner bzw. zu einer geringen Bildung von Ringwurzeln kommt [29,55,56,87,88]. Eckige Pflanzgefäße tragen zudem zur Reduzierung von Ringwurzeln bei [29]. Senkrechte Wände oder besser noch eine sich nach unten konisch verjüngende Form sind besonders im Hinblick auf eine mögliche Verpflanzung des Baumes empfehlenswert.



Abbildung 10: Winterlinde (links) und Platane (rechts) nach vier Jahren in einem glattwandigen Pflanzgefäß. Die Ringwurzeln sind bei beiden Baumarten stark ausgeprägt. Bei der Platane hat sich schon ein geschlossener Wurzelteppich durch Ringwurzeln gebildet. Bei der Winterlinde ist noch Substrat zwischen den Wurzeln zu erkennen.

2.2 Wand

Die Beschaffenheit der Wand hat einen starken Einfluss auf das Wurzelwachstum. Zu beachten ist, dass Pflanzgefäße, die Wurzeldeformationen verringern, nicht unbedingt einen direkten positiven Effekt auf das Wachstum haben [29]. Sie fördern aber eine gleichmäßige Wurzelarchitektur mit hohem Feinwurzelanteil und tragen so zur Vitalitätssteigerung des Baumes im Vergleich zu einem glattwandigen Pflanzgefäß bei [29]. Poröse Pflanzgefäßwände unterstützen zudem die Belüftung des Substrats und verbessern die Sauerstoffversorgung der Wurzeln [87]. Bei Bäumen in Pflanzgefäßen ist die Temperaturbelastung für den Wurzelbereich deutlich intensiver [25,33,47,52,61,68].

Eine in die Pflanzgefäßwand integrierte Wärmedämmung reduziert den Temperatureinfluss auf den Wurzelbereich. Vor allem kann ein wärmegeämmtes Pflanzgefäß sowie eine helle Pflanzgefäßfarbe die Amplitude zwischen maximal und minimal Temperaturwerten abflachen und somit den Wurzelbereich möglichst außerhalb wurzelschädigender Temperaturen halten (unter -5 °C und über 40 °C) [34,60,61,68,73,75,84]. Das effektivste Mittel zur Reduzierung der Substrattemperatur ist die Beschattung des Pflanzgefäßes [61,72], was ab einer entsprechend Baumgröße durch den Baum selbst erreicht werden kann [72].



Abbildung 11: Links: Wurzelteppich aus Ringwurzeln einer Platane nach vier Jahren in einem glattwandigen Pflanzgefäß. Rechts: Freigelegte Wurzelstruktur einer Platane nach vier Jahren in einem glattwandigen Pflanzgefäß. Es ist deutlich erkennbar, dass die Wurzeldeformierung die gesamte Wurzelstruktur betrifft.

2.3 Wasserreservoir

Ein integriertes Wasserreservoir im Pflanzgefäß wirkt sich positiv auf die Wasserversorgung auf den Baum aus, insbesondere in Trockenphasen. In unserer zweiten Versuchsreihe untersuchten wir drei Pflanzgefäßvarianten (kein Wasserreservoir, Wasserreservoir als Anstaubewässerung in der Drainageschicht (Firma Optigrün) und Wasserreservoir als doppelter Boden und Wasserversorgung über Kapillarmatten an der Pflanzgefäßwand (Firma Plantener)). Beide Gefäße mit Wasserreservoir konnten in Trockenphasen die Wasserversorgung für bis zu zwei weitere Tage im Vergleich zum Pflanzgefäß ohne Wasserreservoir aufrechterhalten. Integrierte Wasserreservoir verlängern somit die Reaktionszeit auf einen Bewässerungsausfall in der Pflege. Die zuverlässige Wasserversorgung wirkt sich zudem positiv auf das Baumwachstum aus (Abbildung 12). Die Differenzen bzgl. Stammdurchmesser in den Versuchsergebnissen können vermutlich auf die unterschiedlichen Typen der Wasserversorgung im Pflanzgefäß zurückgeführt werden. Zur Einordnung der gemessenen Werte muss erwähnt werden, dass das Pflanzgefäß von Plantener im Versuche über ein etwas größeres Wasserreservoir verfügte als das Pflanzgefäß von Optigrün. Es lässt sich ableiten, dass die Größe des Wasserreservoirs in der Planung berücksichtigt werden sollte, um eine möglichst große Robustheit zu erreichen und die Vitalität der Bäume dauerhaft zu fördern.

2.4 Standsicherheit

Nach Mattheck [90] ist ein Baum im Pflanzgefäß stand-sicher, wenn der Baumstamm bricht bevor das Pflanzgefäß umfällt. Daraus resultiert folgende Formel:

$$D_c = D * \sqrt[3]{\frac{\sigma_B}{H_c * \rho_w * 4}}$$

Der Pflanzgefäßdurchmesser (D_c) wird dabei als maßgebende Größe aus den Werten Stammdurchmesser (D), Biegefestigkeit des Stammholzes (σ_B), der Pflanzgefäßhöhe (H_c) und gemittelte Wichte aus Substrat und Pflanzgefäß ermittelt (ρ_w). Mattheck [90] gibt als Standardwerte für die Biegefestigkeit des Stammholzes 60 MPa und für die gemittelte Wichte aus Substrat und Pflanzgefäß 14,7 kN/m³ an. Die Ergebnisse beziehen sich auf runde Pflanzgefäße, wobei sich der Ansatz unter Anpassung obiger Formel auch auf quadratische Gefäße oder andere Geometrien übertragen lässt. Abbildung 13 zeigt den aus dieser Formel resultierenden für die Standsicherheit nötigen Pflanzgefäßdurchmesser. Der Vergleich mit den Angaben in Kapitel 1.4 (S.22) zum benötigten Pflanzgefäßvolumen in Abhängigkeit zum Kronendurchmesser legt nahe, dass der Wurzelraumbedarf von Bäumen in Pflanzgefäßen bei entsprechender Wasserversorgung tendenziell niedriger ist als das benötigte Pflanzgefäßvolumen für die Standsicherheit des Baumes im Pflanzgefäß (Abbildung 14). Daher sollte für die Standsicherheit von Bäumen in Pflanzgefäßen die Möglichkeit einer Verankerung des Pflanzgefäßes im Untergrund im Pla-

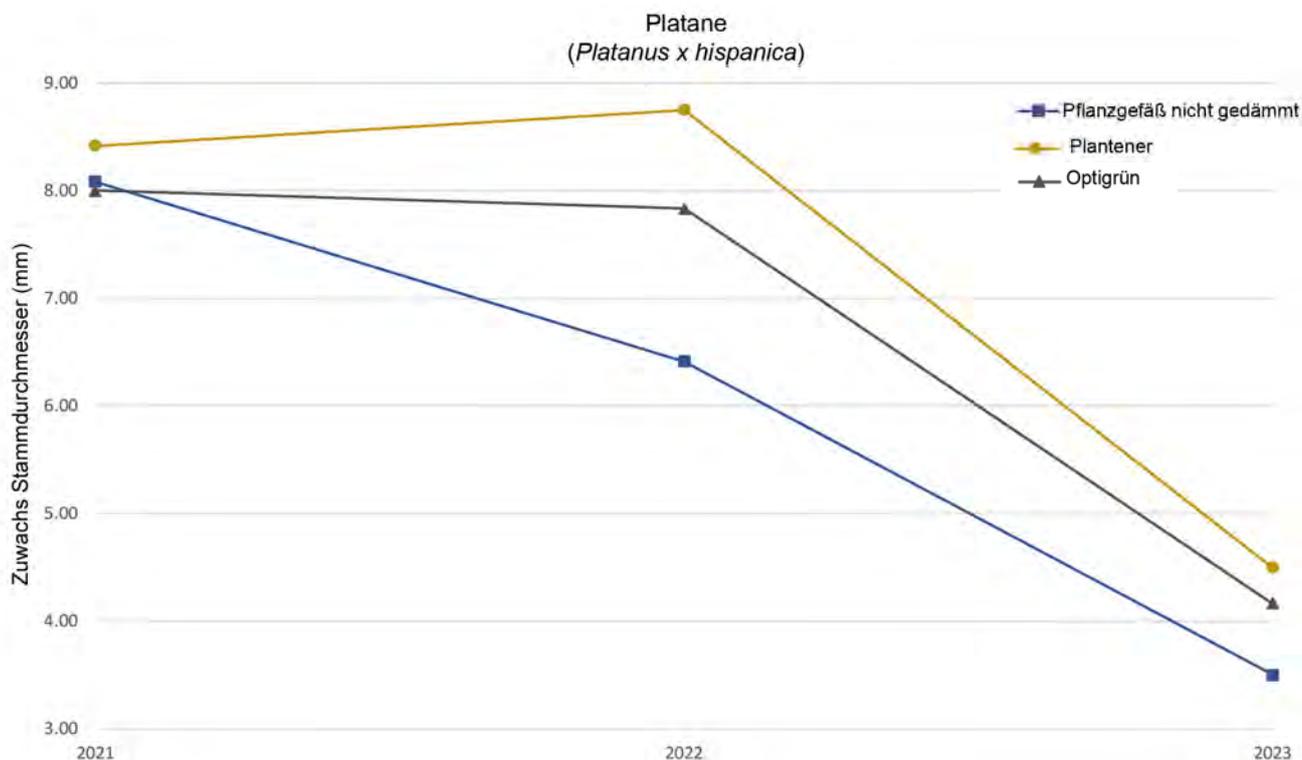


Abbildung 12: Verlauf des jährlichen Stammdurchmesserzuwachses der Versuchsjahre 2021 - 2023 für Platanen (*Platanus x hispanica*) sowie die Pflanzvarianten nicht gedämmtes Pflanzgefäß (blau, ohne Wasserreservoir), Plantener (gelb, mit Wasserreservoir) und Optigrün (grau, mit Wasserreservoir).

Notwendiger Pflanzgefäßdurchmesser in Abhängigkeit von Stammdurchmesser und Pflanzgefäßhöhe zur Standsicherheit gegenüber Windwurf

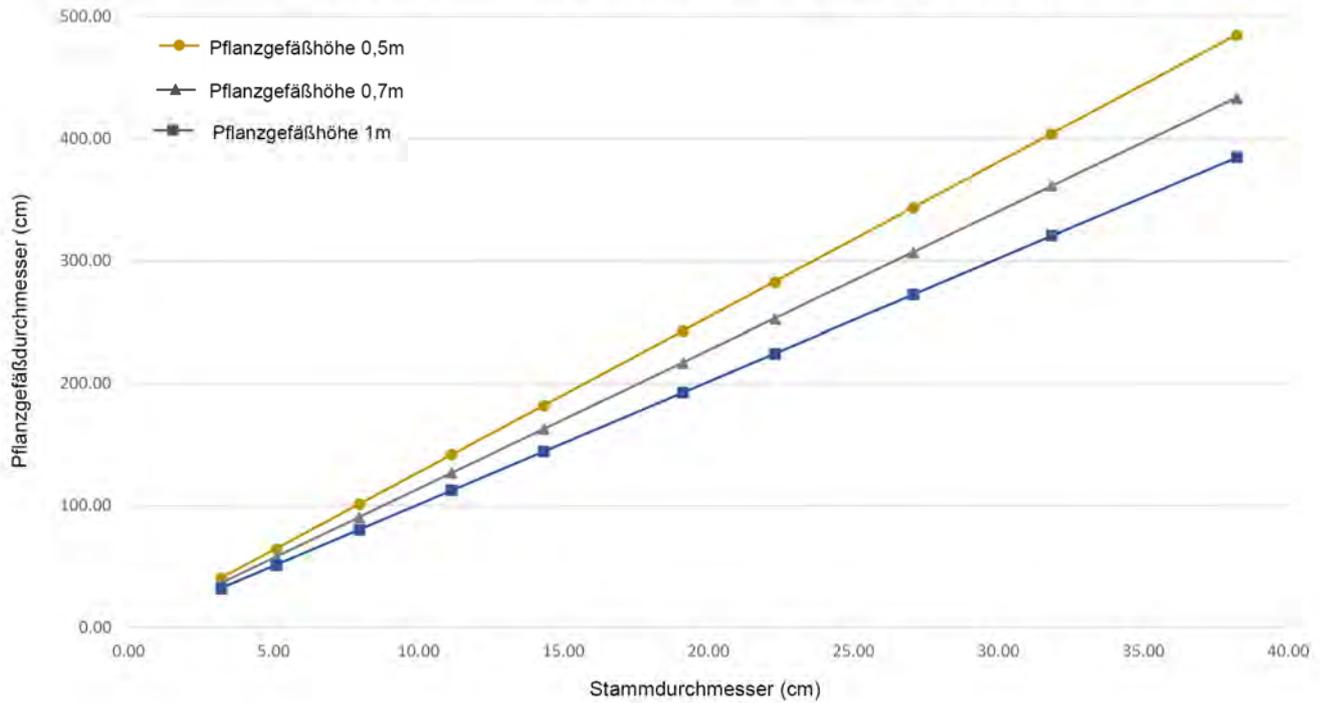


Abbildung 13: Benötigter Pflanzgefäßdurchmesser für die Standsicherheit von Bäumen in Pflanzgefäßen gegen Windwurf, angegeben für die Pflanzgefäßhöhen 0,5m (gelb), 0,7m (grau) und 1m (blau).

Notwendiges Pflanzgefäßvolumen in Abhängigkeit von Stammdurchmesser und Pflanzgefäßhöhe zur Standsicherheit gegenüber Windwurf

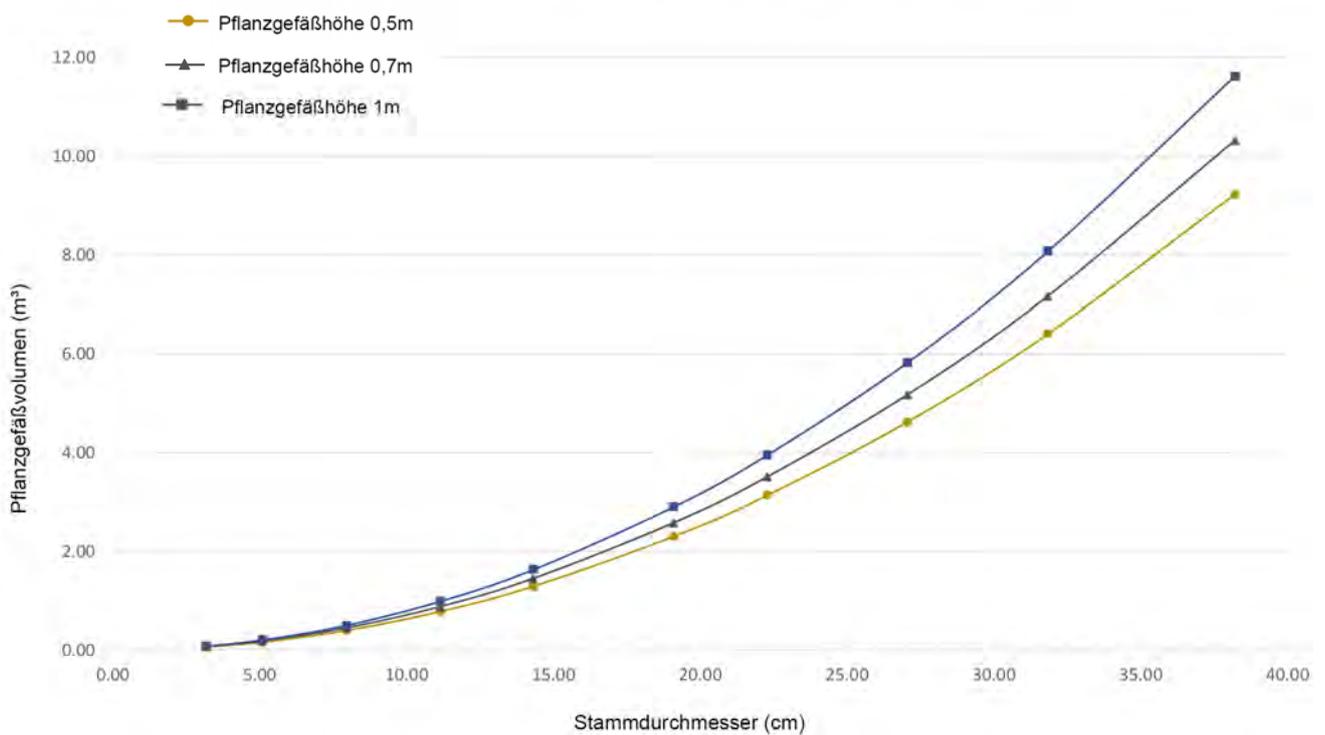


Abbildung 14: Benötigtes Pflanzgefäßvolumen für die Standsicherheit von Bäumen in Pflanzgefäßen gegen Windwurf, angegeben für die Pflanzgefäßhöhen 0,5m (gelb), 0,7m (grau) und 1m (blau).

nungsprozess berücksichtigt werden. Auch der Baum im Pflanzgefäß muss nach der Pflanzung verankert werden, dies kann klassisch über eine Anbindung an Holzpfähle im Pflanzgefäß oder über eine Unterflurverankerung, die im Pflanzgefäß integriert ist, erfolgen. Ist die Verpflanzung des Baumes im Projekt geplant, ist die Verankerung mithilfe von Anbindung an Holzpfählen zu empfehlen.

Sobald der Baum eine Wurzeltiefe von mehr als 80% der Pflanzgefäßhöhe bzw. 83% der Pflanzgefäßbreite bei einer Wurzeltiefe von 15 cm erreicht, ist er mit dem Pflanzgefäß festverwurzelt und würde bei Windwurf mit dem Pflanzgefäß umfallen. Ist dieses Maß an Durchwurzelung noch nicht erreicht, würde bei Windwurf nur der Baum im Pflanzgefäß umfallen. [91]

2.5 Geeignete Baumarten für Pflanzgefäße

Die Baumartenauswahl für Pflanzgefäße ist, aufgrund der beschriebenen komplexen Standortbedingungen, schwierig. Tendenziell kann man sich bei der Baumartenauswahl an den Empfehlungen der Klima-Arten-Matrix von Roloff et al. [82] orientieren. Die dort empfohlenen Baumarten wurden anhand ihrer Eigenschaften ausgewählt, mit einem maximalen Niederschlag von 500 mm/Jahr auszukommen und über eine Frosthärte von mindestens -17,8 bis -23,3 °C (entspricht Winterhärtezonen 6a und 6b) zu verfügen.

Baumarten, die gut dichtgedrängt wachsen, zum Beispiel in Feldgehölzen, kommen tendenziell auch mit dem begrenzten Wurzelraum in einem Pflanzgefäß zu recht [92]. Kleinwüchsige bis mittelgroße Baumarten sind ebenfalls tendenziell besser geeignet als Großbäume für die Pflanzung in Pflanzgefäße, da durch die kleinere Wuchsform ein geringeres Wurzelraumvolumen benötigt wird.

Ausführlichere Aussagen bzw. konkrete Empfehlungen zur Baumartenauswahl, können wir im Rahmen dieses Leitfadens leider nicht tätigen, da wir wie beschrieben nur zwei Baumarten untersucht haben und auch die wissenschaftliche Literatur zu diesem Punkt noch sehr lückenhaft ist. Im Anhang dieses Leitfadens haben wir daher weiterführende Informationen zur Baumartenauswahl für Pflanzgefäße zur Verfügung gestellt.



Innenstadt Freising (Foto: Christoph Fleckenstein, 2024)



Fassade des 25 Verde in Turin (Foto: Fred Romero, 2017)



**Welche
Ökosystem-
leistungen
können Bäume
in Pflanzgefäßen
erbringen?**

3.1 Überblick der Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen

Der Fokus des vorliegenden Leitfadens liegt auf den klimatischen Ökosystemleistungen, die auf den folgenden Doppelseiten anhand unserer Forschungsergebnisse vorgestellt werden. Es wäre jedoch bei weitem zu kurz gegriffen, die Fragestellung auf diese Funktionen zu begrenzen, da Bäume in Pflanzgefäßen im Kontext des gesamten Spektrums möglicher Ökosystemleistungen diskutiert werden sollten.

So ist vor allem die Attraktivität der Stadtnatur für die individuelle Lebenszufriedenheit der Bewohner wichtig, weshalb die Ästhetik und Nähe von Stadtgrün hier einen großen Einfluss haben [3,93-95]. Aufgrund des positiven Einflusses auf Stressreduzierung und die Gesundheit der Anwohner [3,10,93,96] gilt damit Naherholung als die Ökosystemleistung mit dem größten Wert im urbanen Raum [96]. Jegliche Form städtischen Grüns ist somit extrem wichtig für die sozialen Belange der Bewohner [93], womit klar wird, dass gerade auch die identitätsstiftenden und ästhetischen Werte von Bäumen in Pflanzgefäßen bei der Planung zu beachten sind. Denn mit dem menschlichen Wohlergehen gehen neben gesundheitlichen und psychischen letztendlich auch materielle und damit wirtschaftliche Nutzen einher [93].

Zu bedenken ist dabei natürlich immer die geringere Größe von Bäumen in Pflanzgefäßen. Dies gilt es auch bei weiteren Ökosystemleistungen wie der Luftreinigung zu beachten. Je nach Vegetationsstruktur kön-

nen durch Bäume bis zu 80% der Luftpartikel gefiltert werden [96]. So sind in Straßenzügen ohne Bäume bis zu 20.000 Luftpartikel/Liter Luft und in Straßenzügen mit Bäumen nur bis zu 3.000 Luftpartikel/Liter Luft vorhanden, was sich nicht nur positiv auf die Luftqualität im Freiraum, sondern auch in den Gebäuden auswirkt [3].

Kohlenstoffspeicherung und Sauerstoffproduktion gelten bereits bei im Boden wurzelnden Bäumen als weniger relevante Nebeneffekte und können bei der Betrachtung von Bäumen in Pflanzgefäßen aufgrund der vergleichsweise geringen Biomasse vernachlässigt werden. Ebenfalls nur bedingt übertragbar ist die regulatorische Wirkung von Stadtbäumen bezüglich Regenwasserrückhalt. Während im Boden wurzelnde Bäume - vor allem dann, wenn sie eine große offene Baumscheibe aufweisen - effektiv dazu beitragen können, die Folgen von Starkregenereignissen abzumindern [93,94,96], ist diesbezüglich bei Bäumen in Pflanzgefäßen nur mit einem sehr geringen Effekt zu rechnen, da Pflanzgefäße mit ihrer geringen Oberfläche nur sehr eingeschränkt Regen aufnehmen können.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass Bäume in Pflanzgefäßen als punktuelle oder kleinflächige Maßnahmen dazu beitragen können, städtische Räume attraktiver zu gestalten, eine größere Nähe zur Natur herzustellen und damit perspektivisch Tendenzen von Stadtfucht, Segregation oder der aktuell zu beobachtenden Schwächung von Innenstädten entgegenzuwirken.

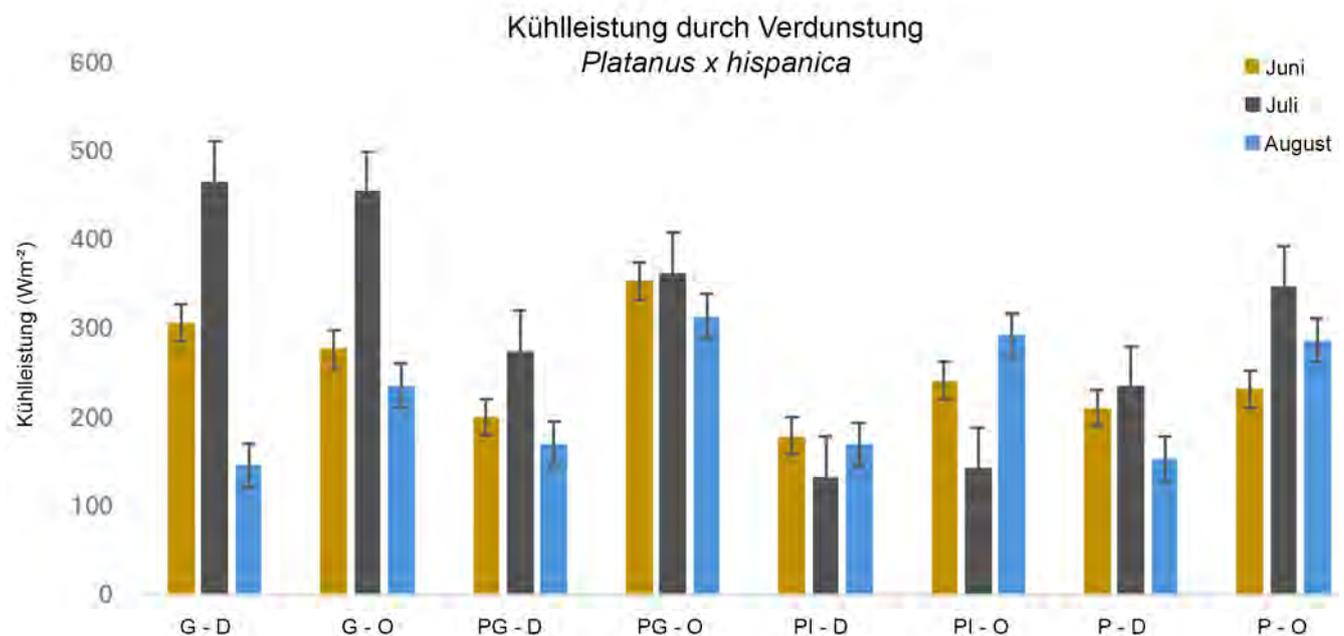


Abbildung 15: Mittelwert und Standardabweichung der Kühlleistung durch Blattverdunstung dargestellt in W/m^2 CPA von Platanen (*Platanus x hispanica*) im Juni (gelb), Juli (grau) und August (blau) 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für gedämmtes Pflanzgefäß und P für nicht gedämmtes Pflanzgefäß; D steht für Trockenstress und O für optimale Bewässerung.

3.2 Klimatische Wirkung von Bäumen in Pflanzgefäßen

Sprechen wir von den klimatischen Wirkungen von Bäumen in Pflanzgefäßen kann nicht oft genug darauf verwiesen werden, dass der Erhalt von Bestandsbäumen und die Neupflanzung weiterer Bäume im Boden in der Regel die effektivste Maßnahme ist, um die thermische Belastung von urbanen Räumen auf mikroklimatischer und gesamtstädtischer Ebene zu reduzieren [2,94,96-98]. Dabei entscheidet die Strahlungstemperatur über das thermische Wohlbefinden der Menschen [99]. Deren Reduzierung, die vor allem durch Verschattung auf mikroklimatischer Ebene erzielt werden kann [2,4,9,98], wirkt sich positiv auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Menschen aus [36]. Die Kühlungseffekte durch Verdunstung und Verschattung sind artenspezifisch [5,9,10,83,97] und können durch Kronenschnitt [9,96] sowie Sonneneinstrahlung, Wind und Verdunstungsdruck beeinflusst werden [94]. Blattbeschaffenheit, -dichte und -anordnung haben dabei nicht nur Auswirkung auf die Verdunstung und Verschattung, sondern auch auf die Filterung von Luftschadstoffen [93,94,96].

Bäume in Pflanzgefäßen sind für Standorte prädestiniert, bei denen die Nutzung oder die bauliche Situation keine Pflanzung im Boden erlaubt. Gleichwohl gilt es, für diese Situationen die klimatischen Wirkungen möglichst gut abzuschätzen und ins Verhältnis zu einem im Boden wachsenden Baum zu setzen, um zielgerichtet planen zu können. Anhand unserer Untersuchungen konnten wir ein Simulationsmodell entwickeln, das die Ökosystemleistungen Schattenfläche

und Verdunstungskühlung von Bäumen in Pflanzgefäßen in Abhängigkeit vom Substratvolumen und der Baumart über die Zeit prognostiziert. Mit dem bereits existierenden Simulationsmodell für Stadtbäume (vgl. Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern) können somit präzise Abschätzungen und Vergleiche unter verschiedenen Standortbedingungen gemacht werden. Die auf den folgenden Seiten wiedergegebenen Wachstumsraten für die Baumarten Platane und Winterlinde beziehen sich für die Bäume im Boden auf die Angaben von Rötzer et al. [100] und für die Bäume im Pflanzgefäß auf Dervishi et al. [101]. Die Angaben zur Verdunstungsleistung beziehen sich auf Rahman et al. [102]. Eine wesentliche Grundlage dieser Vergleiche ist neben der Wachstumsprognose eine verlässliche Aussage dazu, inwiefern sich die Verdunstungsleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen bezogen auf die Kronenprojektionsfläche von solchen im Boden unterscheidet. Dazu zeigen die Abbildungen 15 und 16 die Verdunstungsleistung von Platane und Winterlinde, gemessen an einzelnen Tagen in den Monaten Juni, Juli und August 2022. Dabei ist eine Tendenz erkennbar, dass sich die Beschränkung des Wurzelraums negativ auf die Verdunstungsleistung von Bäumen auswirkt. Aber auch die Wasserversorgung hat hier einen deutlichen Einfluss. In Summe lässt sich schlussfolgern, dass die ermittelte Kühlleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen im Bereich von 200 - 300 W/m² Kronenprojektionsfläche als hoch genug zu bewerten ist, um einen signifikanten Beitrag zur Kühlung des Mikroklimas in stark versiegelten urbanen Räumen zu leisten.

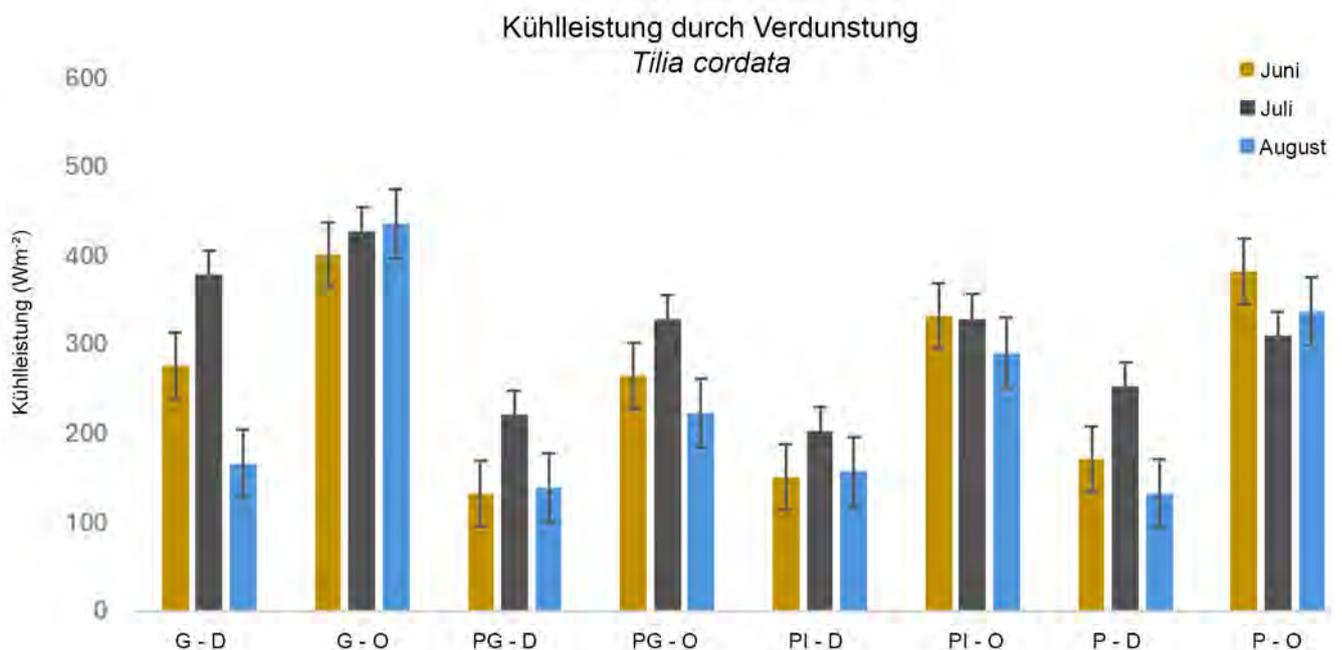


Abbildung 16: Mittelwert und Standardabweichung der Kühlleistung durch Blattverdunstung dargestellt in W/m² CPA von Winterlinden (*Tilia cordata*) im Juni (gelb), Juli (grau) und August (blau) 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für gedämmtes Pflanzgefäß und P für nicht gedämmtes Pflanzgefäß; D steht für Trockenstress und O für optimale Bewässerung.

3.3 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Platane

Wie unter 1.2 beschrieben wird in diesem Leitfaden die Platane (*Platanus x hispanica*) als stellvertretende Baumart für schnellwüchsige und trockenheitstolerante Baumarten verwendet. In Abbildung 17 sind zwei Zeitachsen dargestellt, die den Wachstumsverlauf einer Platane im Boden (oben) und in einem Pflanzgefäß mit 2 m³ Volumen (unten) sowie die entsprechende Ökosystemleistung in Form von Verdunstung und Verschattung zeigen.

Beide Bäume haben zum Pflanzzeitpunkt einen Stammumfang von 10 – 12 cm. Für den Baum im Pflanzgefäß wird ein Bewässerungsregime mit zwei Gießgängen pro Woche mit einem Wurzelraumbedarf von 0,1 m³/m² Kronenprojektionsfläche angesetzt (siehe Kapitel 1.4, S.22). Für die Platane im Boden wurde der Mittelwert für den Wurzelraumbedarf von 0,45 m³/m² von Lindsey und Bassuk [11] angenommen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Zuwachs im Pflanzgefäß stagniert sobald das verfügbare Substratvolumen vollständig durchwurzelt ist und somit auch die Verdunstungsleistung und die verschattete Fläche unter der Krone nur noch minimal zunehmen. Die Platane erreicht diesen Punkt im gezeigten Beispiel voraussichtlich nach 10 bis 15 Jahren Wachstum im Pflanzgefäß. In dieser Konsequenz erreicht in dieser Simulation im Alter von 40 Jahren die Platane im Boden eine Verdunstungsleistung von knapp 50 kW während der gleiche Baum im Pflanzgefäß nur ca. 6 kW erreicht. Um eine vergleichbare Verdunstungskühlung zu erreichen müsste als Ersatz für einen im Boden wachsende Platane mindestens 8 Platanen in einem Pflanzgefäß vorgesehen werden.

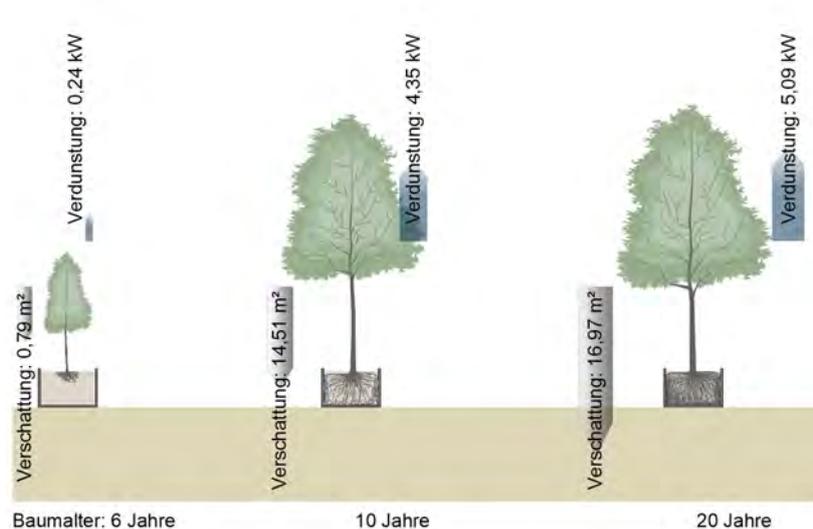
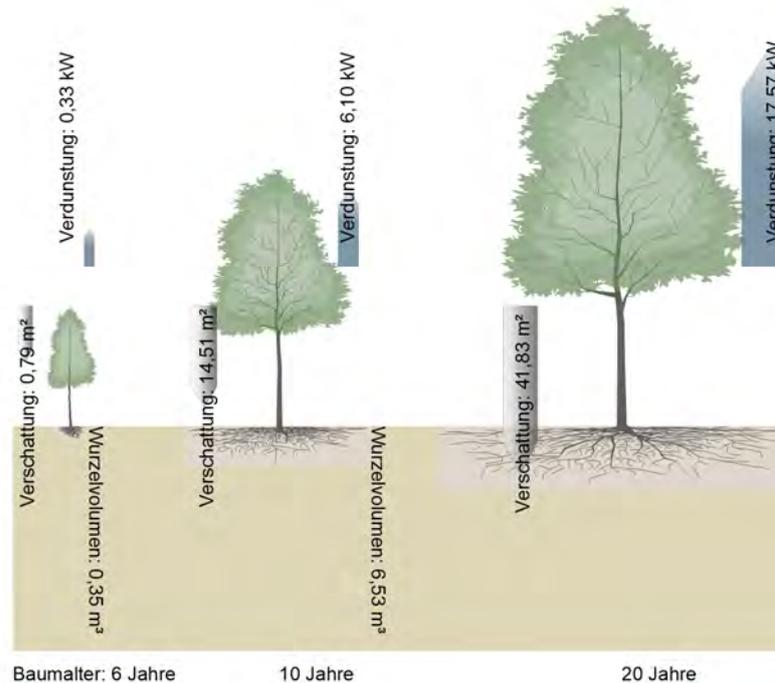
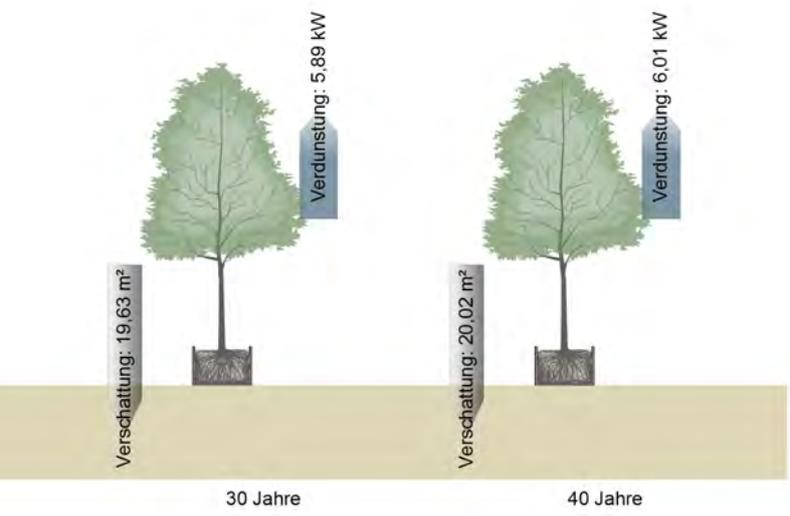
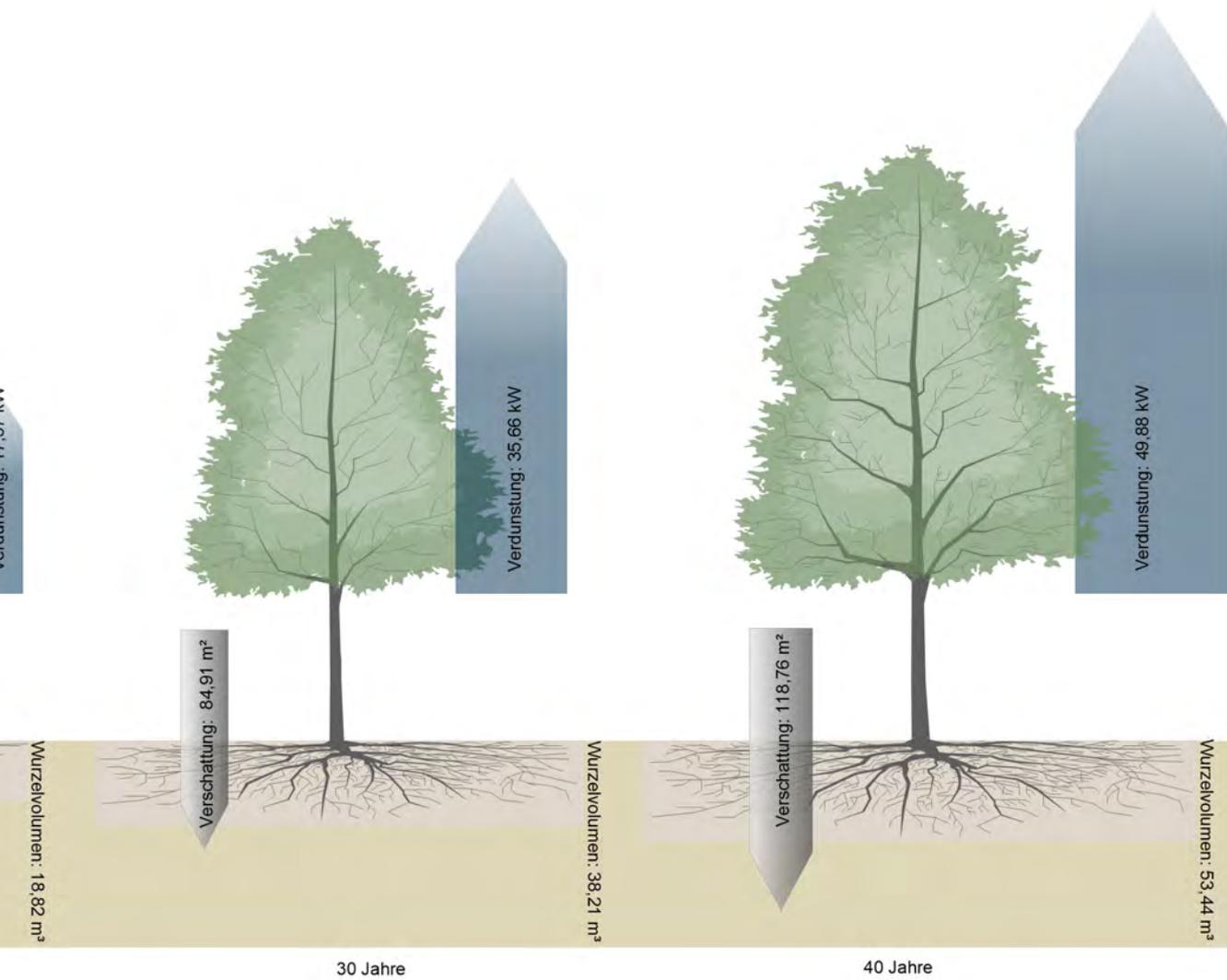


Abbildung 17: Ökosystemleistungen von Platanen im Boden (oben) und im Pflanzgefäß (unten) in bestimmten Altersklassen. Grafisch dargestellt sind die Kühlleistung durch Verdunstung, die verschattete Fläche und der benötigte Wurzelraum [vgl. 100-102].



3.4 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Winterlinde

Wie unter 1.2 beschrieben wird in diesem Leitfaden die Winterlinde (*Tilia cordata*) als stellvertretende Baumart für langsam wüchsige und weniger trockenheitstolerante Baumarten verwendet. In Abbildung 18 sind zwei Zeitachsen dargestellt, die den Wachstumsverlauf einer Winterlinde im Boden (oben) und im Pflanzgefäß mit 2 m³ Volumen (unten) sowie die korrelierende Ökosystemleistung in Form von Verdunstung und Verschattung zeigen.

Beide Bäume haben zum Pflanzzeitpunkt einen Stammumfang von 10 – 12 cm. Für den Baum im Pflanzgefäß wird ein Bewässerungsregime mit zwei Gießgängen pro Woche mit einem Wurzelraumbedarf von 0,1 m³/m² Kronenprojektionsfläche angesetzt (siehe Kapitel 1.4, S.22). Für die Winterlinde im Boden wurde der Mittelwert für den Wurzelraumbedarf von 0,45 m³/m² von Lindsey und Bassuk [11] angenommen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Zuwachs im Pflanzgefäß stagniert sobald das verfügbare Substratvolumen vollständig durchwurzelt ist und somit auch die Verdunstungsleistung und die verschattete Fläche unter der Krone nur noch minimal zunehmen. Die Winterlinde erreicht diesen Punkt im gezeigten Beispiel vorrausichtlich nach 20 bis 25 Jahren Wachstum im Pflanzgefäß. In dieser Konsequenz erreicht in dieser Simulation im Alter von 40 Jahren die Winterlinde im Boden eine Verdunstungsleistung von 22 kW während der gleiche Baum im Pflanzgefäß ca. 5 kW erreicht. Um eine vergleichbare Verdunstungskühlung zu erreichen, müsste als Ersatz für eine im Boden wachsende Winterlinde mindestens 4 Winterlinden in einem Pflanzgefäß vorgesehen werden. Aufgrund der geringeren Wachstumsgeschwindigkeit ist die Diskrepanz zwischen Boden und Pflanzgefäß hier nur halb so groß wie bei der schnellwüchsigen Platane.

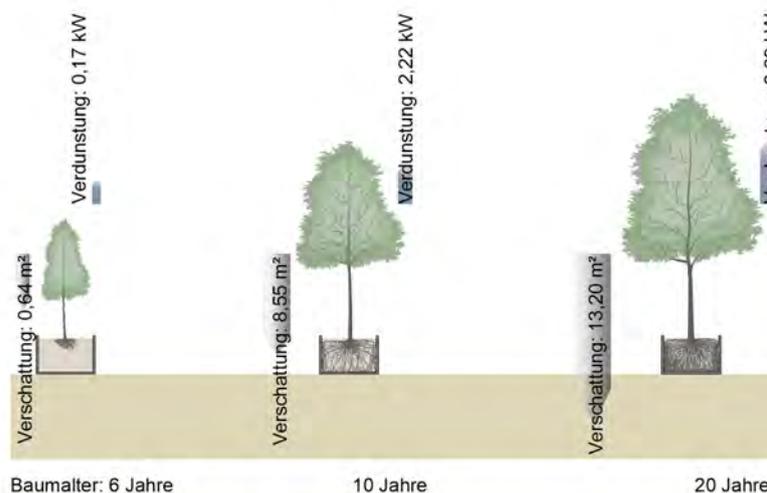
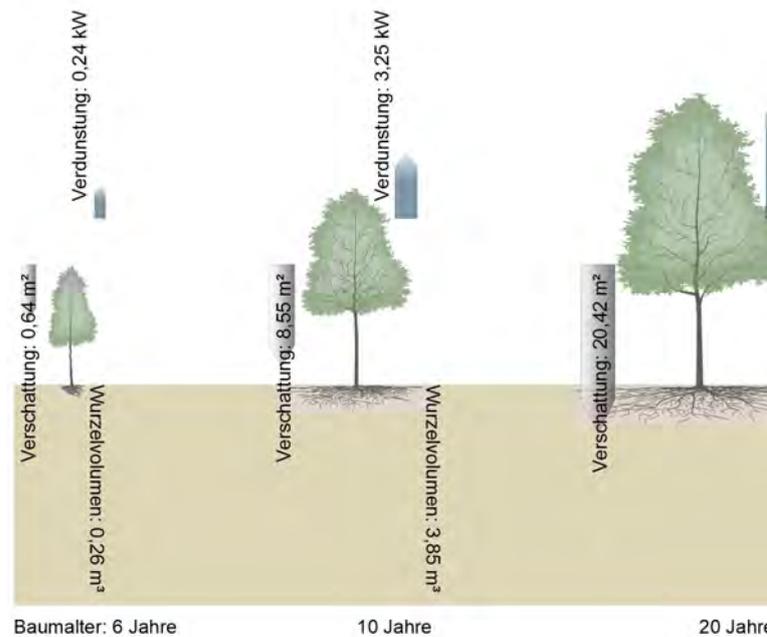
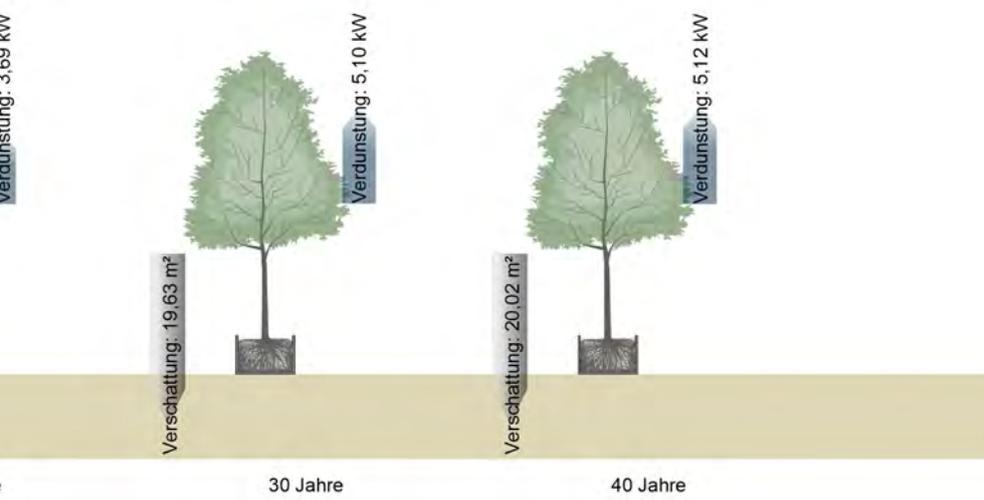
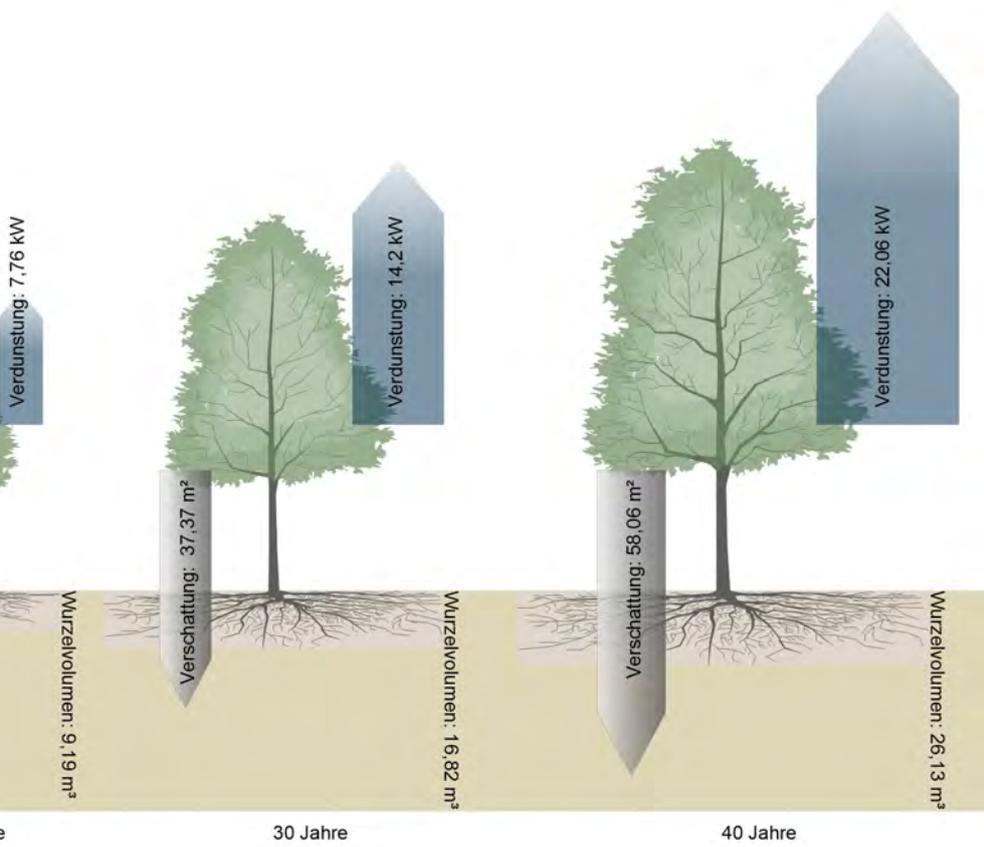
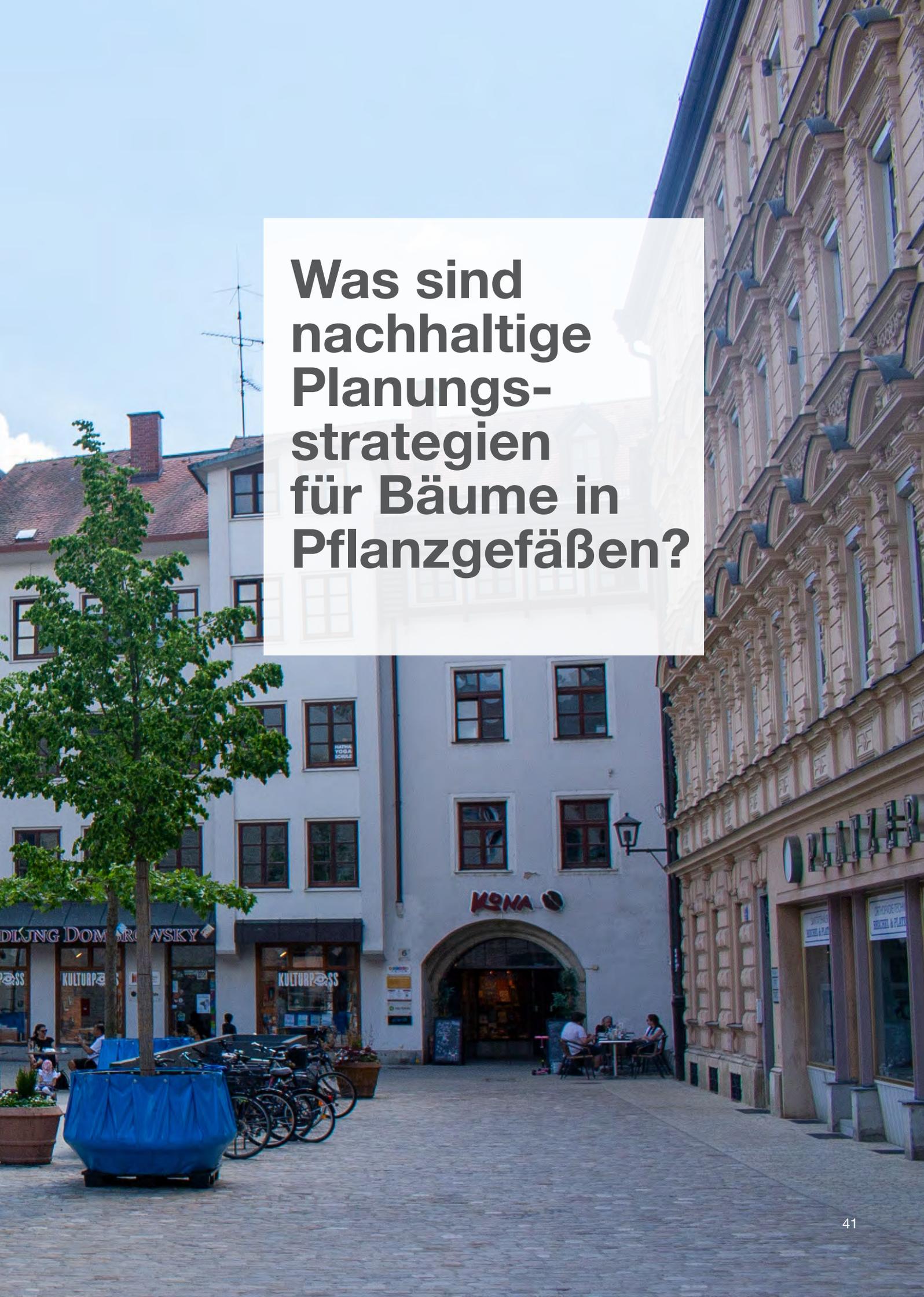


Abbildung 18: Ökosystemleistungen von Winterlinden im Boden (oben) und im Pflanzgefäß (unten) in bestimmten Altersklassen. Grafisch dargestellt sind die Kühlleistung durch Verdunstung, die verschattete Fläche und der benötigte Wurzelraum [vgl. 100-102]





Hotspotpots Innenstadt Regensburg (Foto: Christoph Fleckenstein)

A street scene in a European town. In the foreground, a young green tree is planted in a large, blue, cylindrical planter on a cobblestone street. To the left, a white building has a sign for 'KULTURPASS' and 'KONING DOMBROWSKY'. In the center, a white building features a red 'KONA' sign above an arched entrance. To the right, a historic stone building with ornate architectural details is visible. The sky is clear and blue.

Was sind nachhaltige Planungsstrategien für Bäume in Pflanzgefäßen?

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, sind die Wachstumsdynamik und die Lebenserwartung zentrale Aspekte, die bei der Planung von Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen zu berücksichtigen sind. Da das Pflanzgefäß wie bereits erwähnt nur einen sehr begrenzten Wurzelraum zur Verfügung stellt, wird der Baum nach einer gewissen Zeit in seinem Wachstum eingeschränkt und verliert nach 20 bis 40 Jahren Wachstum im Pflanzgefäß zunehmend an Vitalität und stirbt letztendlich früher oder später ab. Der tatsächliche Zeitraum hängt stark von der Größe, Form und Beschaffenheit des Pflanzgefäßes sowie der Größe des Baumes bei der Pflanzung sowie der Baumart und der Pflege ab. Ein weiterer wichtiger zeitlicher Aspekt, der in der Planung berücksichtigt werden muss, ist die Lebensdauer des Pflanzgefäßes, da ein beschädigtes Pflanzgefäß möglicherweise nicht mehr den vegetations-technischen Anforderungen gerecht werden und im schlimmsten Fall ein Sicherheitsrisiko darstellt oder Schäden am Unterbau verursacht. Darüber hinaus hat die Lebensdauer und Nutzung des Freiraums oder des Gebäudes auf die zeitlichen Prozesse eines Projektes Auswirkungen. So kann eine Freifläche von verschiedenen Events (Wochenmarkt, Konzert, etc.) bespielt werden, die unterschiedliche Anforderungen durch das Umstellen der Bäume in gewissen Maße einzugehen. Diese Flexibilität ist jedoch nur mit einer guten Koordination der involvierten Akteure (Planer:in, Gärtner:in, Baumschule, GaLa-Bau, Pflanzgefäßhersteller) möglich. Die notwendige Koordination der Beteiligten ist auch für die Pflege, die mögliche Verpflanzung der Bäume an einen neuen Standort und bei einem Austausch der Bäume schon in der Planung zu berücksichtigen. In einem schlüssigen Entwurfskonzept müssen daher diese zeitlichen Aspekte klar benannt und dargestellt werden. Nur so kann gewährleistet werden, dass die Prinzipien der nachhaltigen Gestaltung, d.h. des verantwortungsbewussten Einsatzes von Material und die Vermeidung von Müll, sichergestellt sind. Zu diesem Zweck wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine eigene Entwurfstypologie in Verbindung mit einer eigenen Darstellungsform entwickelt. Diese ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn Bäume in Pflanzgefäßen nicht nur aus ästhetischen Gründen in einem Projekt verwendet werden, sondern bestmögliche klimatische Leistungen erbringen und dabei als alternative Begrünungsform auch ökonomischen Aspekten genügen soll.

4.1 Zeitabhängige Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen

Im Folgenden stellen wir die entwickelte zeitabhängige Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen vor. Die Typologie umfasst 13 Kerntypen, die durch fünf Entwurfparameter charakterisiert werden können, darunter (1) der zeitliche Rahmen des Projektes, (2) der räumliche Kontext, (3) der Baum, (4) das Pflanzgefäß und (5) der lokale Einfluss. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die 13 Typen und welche Entwurfparameter sie erfüllen. Mit Hilfe von Tabelle 2 kann man feststellen, welcher Typ für das eigene Projekt geeignet ist. „+“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als vollständig geeignet für den Entwurfparameter. „o“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als geeignet mit technischen Anpassungen, z. B. wenn er auf dem Dach oder an der Fassade eines Gebäudes montiert werden soll. „-“ bedeutet, dass der Entwurfparameter nicht auf den zeitabhängigen Typ zutrifft.

Der Projektzeitraum beschreibt die voraussichtliche Dauer des Projekts. Diese kann entweder eher kurz, d.h. temporär sein, zwischen einigen Wochen und bis zu zehn Jahren, oder permanent mit einer Dauer von mehr als zehn Jahren. Die Unterscheidung zwischen temporär und dauerhaft wird bei der Zehn-Jahres-Marke gesetzt, da dies die Zeitspanne ist, die ein Baum laut unseren Experteninterviews in einem Pflanzgefäß wachsen und anschließend nochmals verpflanzt werden kann. Der Parameter für den räumlichen Kontext legt fest, ob das Projekt auf einer Freifläche oder an einem Gebäude geplant ist. Der Gestaltungsparameter für den Baum berücksichtigt die voraussichtliche Lebensdauer des Baums im Pflanzgefäß und ob der Baum nach seiner Zeit im Pflanzgefäß verpflanzt werden soll. „Verpflanzung“ bedeutet, dass eine geplante Verpflanzung des Baumes nach einem Zeitraum von fünf bis zehn Jahren im Pflanzgefäß möglich ist, was die Möglichkeit des Umtopfens einschließt. Der Parameter „Pflanzgefäß“ ist durch die vorübergehende oder dauerhafte Nutzung des Pflanzgefäßes gekennzeichnet. Hier gilt die gleiche Unterscheidung der Zeitspannen wie bei Projektzeitraum und Baum. „Mobil“ bedeutet, dass das Pflanzgefäß mit dem Baum je nach Größe und Gewicht mit einem Handhubwagen, einem Gabelstapler oder einem Kran bewegt werden kann. Das Pflanzgefäß ist also entweder nicht befestigt oder leicht vom Boden lösbar. „Unbeweglich“ bedeutet, dass das Pflanzgefäß ein integraler Bestandteil der Freifläche oder des Gebäudes ist und nicht von ihr/ihm abgenommen werden kann, oder dass seine Größe und sein Gewicht einen praktischen Transport

mit einem Gabelstapler oder einem Kran nicht zulassen. „Wiederverwendung“ bedeutet, dass das Pflanzgefäß wiederverwendet werden kann, nachdem der Baum entfernt wurde. Das Design des Pflanzgefäßes muss eine einfache Entfernung des Baumes ermöglichen, damit es wiederverwendbar wird. Der Parameter „Lokaler Einfluss“ gibt an, ob die Art der Bepflanzung räumliche und mikroklimatische Auswirkungen hat und ob diese Auswirkungen tendenziell unmittelbar oder langfristig

sind. „Unmittelbarer Einfluss“ bedeutet, dass der zeitabhängige Typ unmittelbar nach Abschluss der Bauarbeiten eine räumliche und mikroklimatische Auswirkung hat. Dies wird entweder durch die Verwendung größerer Bäume und/oder vieler Bäume erreicht. „Langfristiger Einfluss“ bedeutet, dass sich der Baum in den ersten drei bis fünf Jahren etablieren muss, bevor seine Wirkung voll spürbar ist. Dafür wird der Baum tendenziell länger als zehn Jahre im Pflanzgefäß wachsen.

Entwurfparameter	Standard	Chasmophyt	Bonsai	Pflanzgefäßgesellschaft	Ausdehnen	Ausdünnen	Überschneiden	Lücken füllen	Baumverleih	Baumaustausch	Baumzwischenutzung	Baumzwischenlagerung	Baumfassade
1. Projektzeitraum													
Permanent	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+
Temporär	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-
2. Räumlicher Kontext													
Freiraum	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Gebäude	o	o	o	o	-	-	-	-	-	o	o	-	+
3. Baum													
Permanent	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
Temporär	-	-	-	-	-	o	o	o	+	+	+	+	-
Verpflanzung	-	-	o	-	-	o	o	o	+	+	+	+	-
4. Pflanzgefäß													
Permanent	+	+	o	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+
Temporär	-	-	-	-	-	o	o	o	+	o	o	+	-
Mobil	o	o	+	o	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Unbeweglich	o	o	-	+	-	o	-	-	-	-	o	-	+
Wiederverwendung	-	-	o	-	-	o	o	o	+	+	+	+	-
5. Lokaler Einfluss													
Unmittelbar	o	-	-	o	+	+	+	+	+	+	+	+	o
Langfristig	+	+	+	+	+	+	+	+	-	o	o	-	+

Tabelle 2: Übersicht über die 13 identifizierten zeitabhängigen Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen und für welchen Entwurfparameter sie gelten. „+“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als vollständig geeignet für den Entwurfparameter. „o“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als geeignet mit technischen Anpassungen, z. B. wenn er auf dem Dach oder an der Fassade eines Gebäudes montiert werden soll. „-“ kennzeichnet, dass der Entwurfparameter nicht auf den zeitabhängigen Typ zutrifft.

4.2 Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen

In diesem Kapitel werden die 13 Kerntypen der zeitabhängigen Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen vorgestellt und kurz beschrieben.

Standard

Der Typ „Standard“ (Abbildung 19) definiert sich über die Pflanzung eines Standard-Solitärbaums aus der Baumschule in ein Pflanzgefäß. Der Baum bleibt so lange im Pflanzgefäß, bis er abstirbt oder nicht mehr den ästhetischen Anforderungen entspricht. Der Baum und das Pflanzgefäß werden entsorgt, wenn der Baum stirbt oder wenn der Projektzeitraum endet.

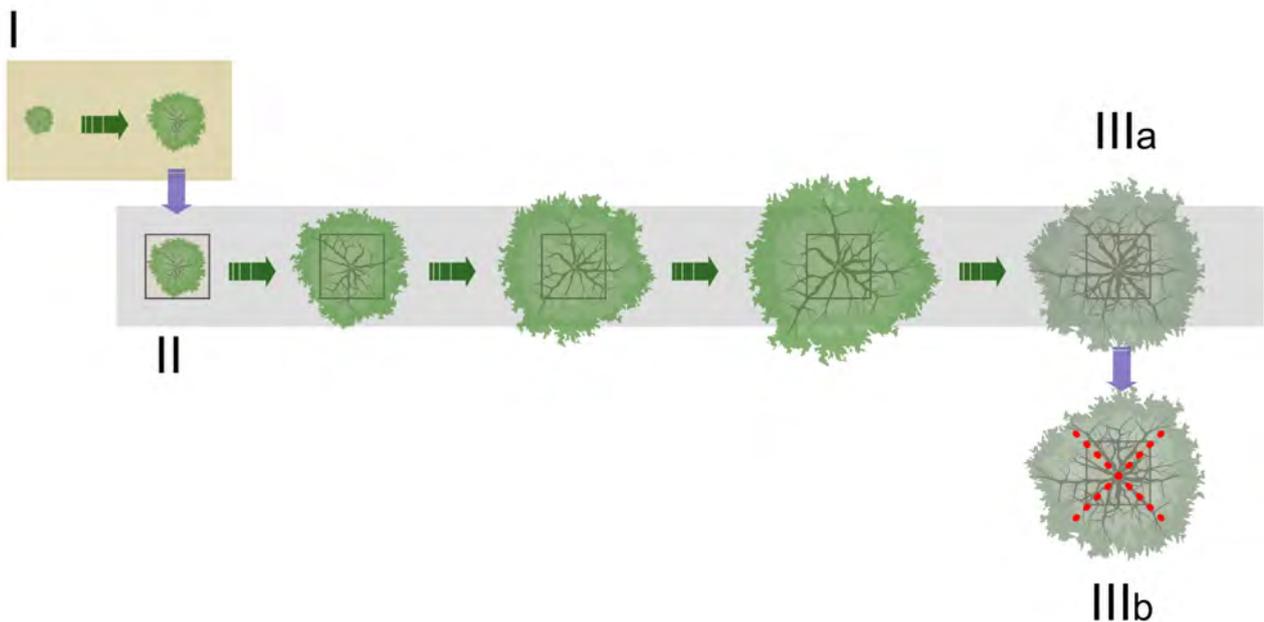


Abbildung 19: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Standard“. I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in das Pflanzgefäß auf dem Projektgelände, Baum beginnt im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: Absterben des Baumes oder Ende des Projektzeitraums, Entfernung von Baum und Pflanzgefäß vom Projektgelände; IIIb: Entsorgung von Baum und Pflanzgefäß.

Chasmophyt

Der Typ „Chasmophyt“ (Abbildung 20) nutzt die Anpassungsfähigkeit einiger Baumarten, in Felsspalten mit sehr kleinem Substratvolumen zu wachsen und so mit minimaler Nährstoff- und Wasserversorgung zu gedeihen. Die Bäume werden als Setzlinge gepflanzt. Die Wachstumsrate des Baumes wird bewusst niedrig gehalten, um eine möglichst lange Lebensdauer zu erreichen. Die Bewässerungs- und Düngevorgaben müssen so angepasst werden, dass gerade so viel Wasser und Nährstoffe zugeführt werden, dass der Baum nur

minimal wächst. Die Form des Pflanzgefäßes kann so angepasst werden, dass sie eine Felsspalte imitiert. Das langsame Wachstum derart bewusst gestresster Bäume lässt keine üppigen Baumkronen zu, die das höchste Kühlungspotenzial aufweisen. Der Pflanztyp eignet sich für Situationen, in denen der begrenzte Platz nur kleinere Pflanzgefäße zulässt, aber eine lange Lebensdauer der Bäume gewünscht ist. Der Baum und das Pflanzgefäß werden in der Regel entsorgt, wenn der Baum abstirbt oder wenn der Projektzeitraum endet.

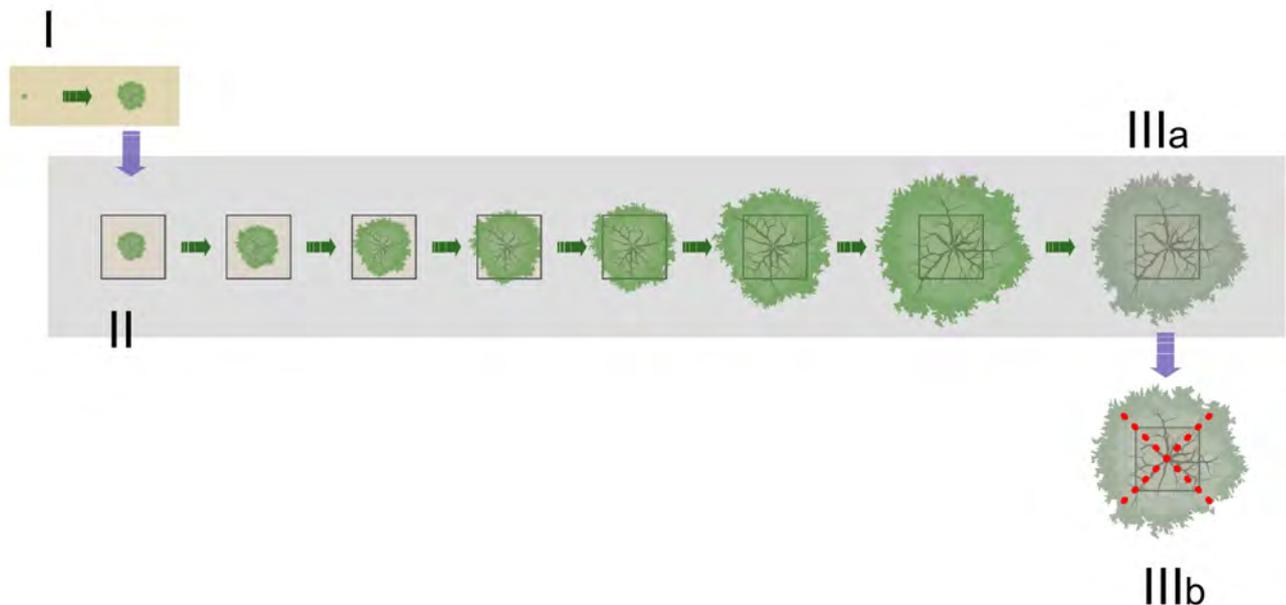


Abbildung 20: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Chasmophyt“. I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in das Pflanzgefäß auf dem Projektgelände, der Baum beginnt langsam im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: Absterben des Baumes oder Ende des Projektzeitraums, Entfernung von Baum und Pflanzgefäß vom Projektgelände; IIIb: Entsorgung von Baum und Pflanzgefäß.

Bonsai

Der Typ „Bonsai“ (Abbildung 21) basiert auf der Bonsaikultur mit regelmäßigem Wurzelschnitt in Kombination mit Substratwechsel und ggf. Umtopfen in ein neues, aber gleich großes Pflanzgefäß. Die Maßnahme des Wurzelschnitts ist entscheidend, um den Baum auf einer Größe zu halten, die für die Größe des Pflanzgefäßes, in dem er wächst, geeignet ist. Durch das Auswech-

seln der äußeren Substratschicht erhält der Baum neuen Wurzelraum. Das Pflanzgefäß sollte mit abnehmbaren Wänden gebaut werden, um einen einfachen Zugang zu den Wurzeln und zum Umtopfen zu ermöglichen. Neben dem Wurzelschnitt und dem Substratwechsel kann beim Umtopfen auch ein Austausch des Pflanzgefäßes erforderlich sein. Im günstigsten Fall kann der Baum mehr als hundert Jahre alt werden [84].

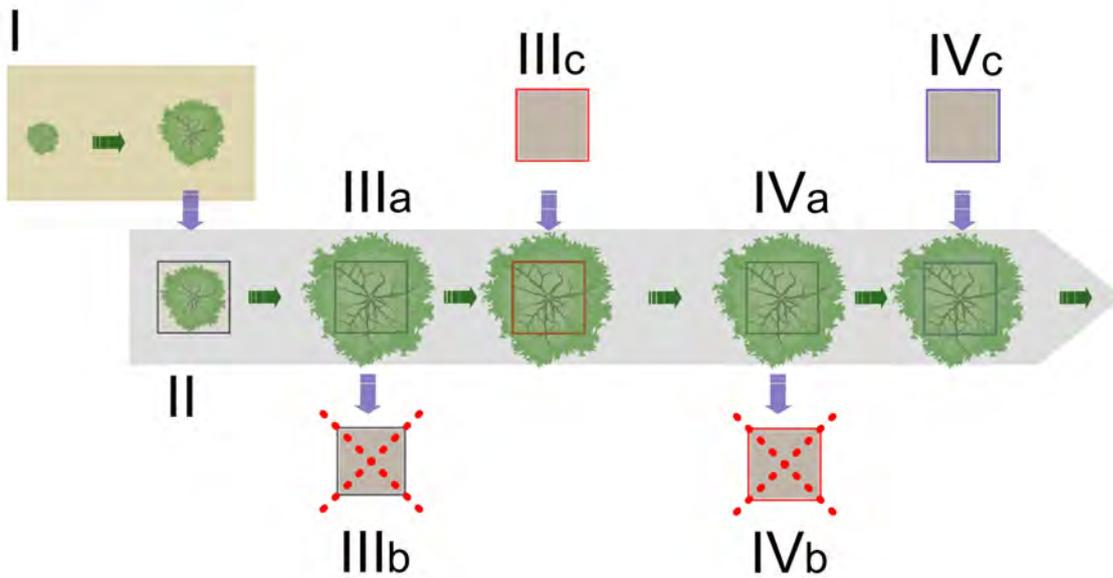


Abbildung 21: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Bonsai“. I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in das Pflanzgefäß am Projektstandort, der Baum beginnt im Gefäß zu wachsen; IIIa: Herausnehmen des Baumes aus dem Gefäß, die Wurzeln können beschnitten werden; IIIb: Entsorgung des alten Gefäßes; IIIc: Einpflanzen des Baumes in ein neues Gefäß; IVa - IVc: Wiederholung der Prozesse von IIIa, IIIb und IIIc.

Pflanzgefäßgesellschaft

Beim Typ „Pflanzgefäßgesellschaft“ (Abbildung 22) wird ein großes Pflanzgefäß verwendet, in dem eine Pflanzengemeinschaft aus mehreren Bäumen, Sträuchern und Stauden gebildet werden kann. Der gemeinsam genutzte Wurzelraum in einem großen Pflanzgefäß ermöglicht eine hohe Pflanzdichte und kann eine unmittelbare ästhetische und mikroklimatische Wirkung an

der Pflanzstelle erzielen. Im Falle des Absterbens eines einzelnen Baumes können die verbleibenden Pflanzen in die Lücke hineinwachsen und den Verlust des Baumes im Laufe der Zeit ausgleichen. Aufgrund des relativ großen Wurzelraums, der in einem gemeinsamen Pflanzgefäß zur Verfügung steht, hängt die maximal mögliche Lebensdauer stark von der Haltbarkeit des Pflanzgefäßes ab.

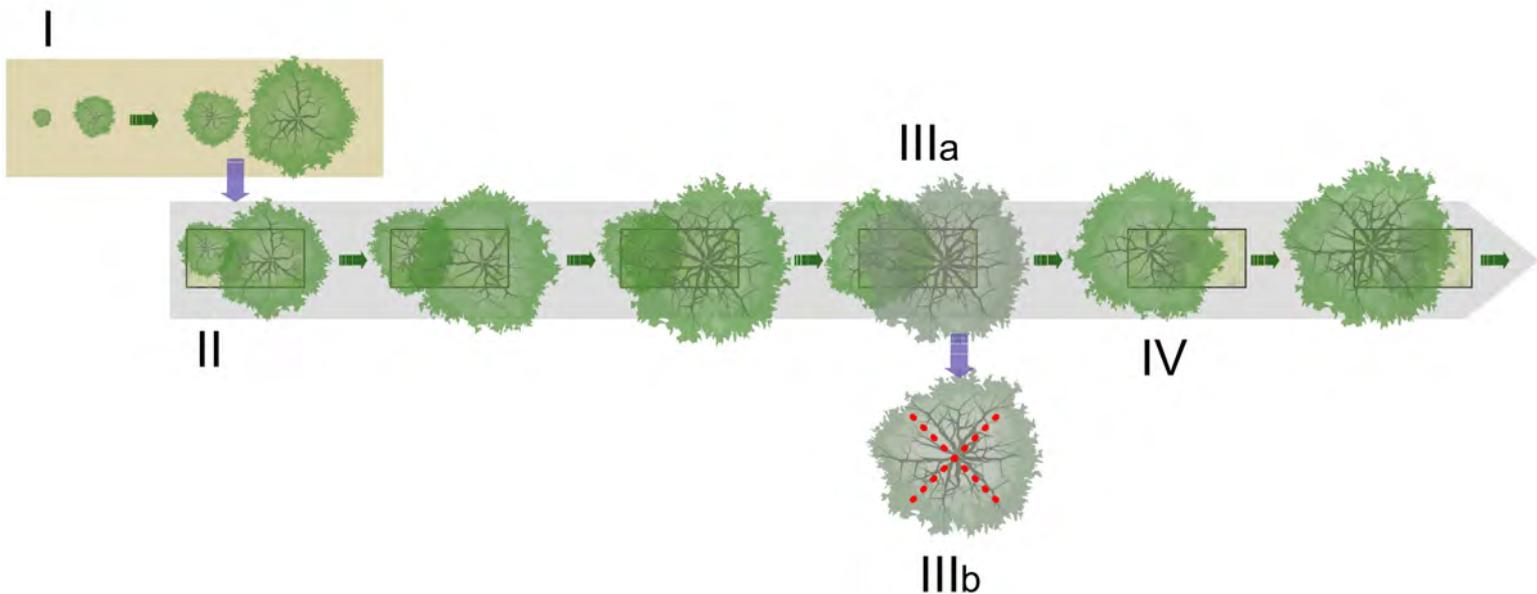
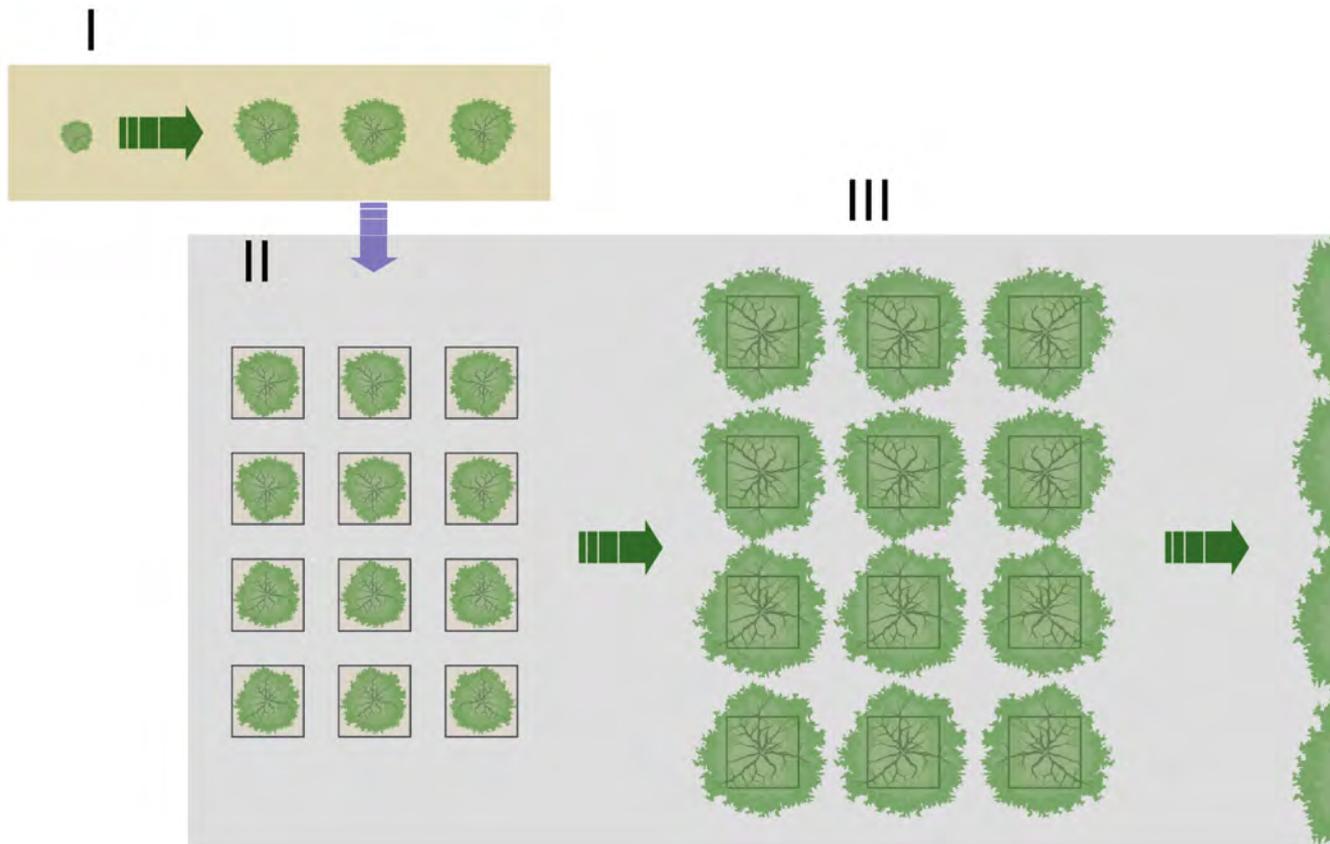


Abbildung 22: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Pflanzgefäßgesellschaft“. I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in das Pflanzgefäß am Projektstandort, Bäume beginnen im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: im Falle des Absterbens eines Baumes: Entfernung des toten Baumes aus dem Pflanzgefäß, der gesunde Baum wächst im Pflanzgefäß weiter; IIIb: Entsorgung des toten Baumes.

Ausdehnen

Der Typ „Ausdehnen“ (Abbildung 23) kann eine unmittelbare ästhetische und mikroklimatische Wirkung erzielen, indem viele Bäume in Pflanzgefäßen gruppiert werden. Bei der Pflanzung werden die Bäume in Pflanzgefäßen dicht nebeneinandergesetzt, um einen Hain zu bilden. Trotz relativ kleiner Kronen kann so ein Mikroklima unter der Baumkrone geschaffen werden, das sich deutlich

von der Umgebung unterscheidet. Mit der Zeit wird die Baumkrone dichter und der Abstand zwischen den Bäumen, also den Pflanzgefäßen, kann vergrößert werden. Diese Maßnahme wird so lange wiederholt, bis die maximale Kronenbedeckung erreicht ist und die Bäume in den Pflanzgefäßen an ihrem endgültigen Standort stehen. Bei dieser Art der Bepflanzung müssen die Bäume in mobilen Pflanzgefäßen gepflanzt werden.



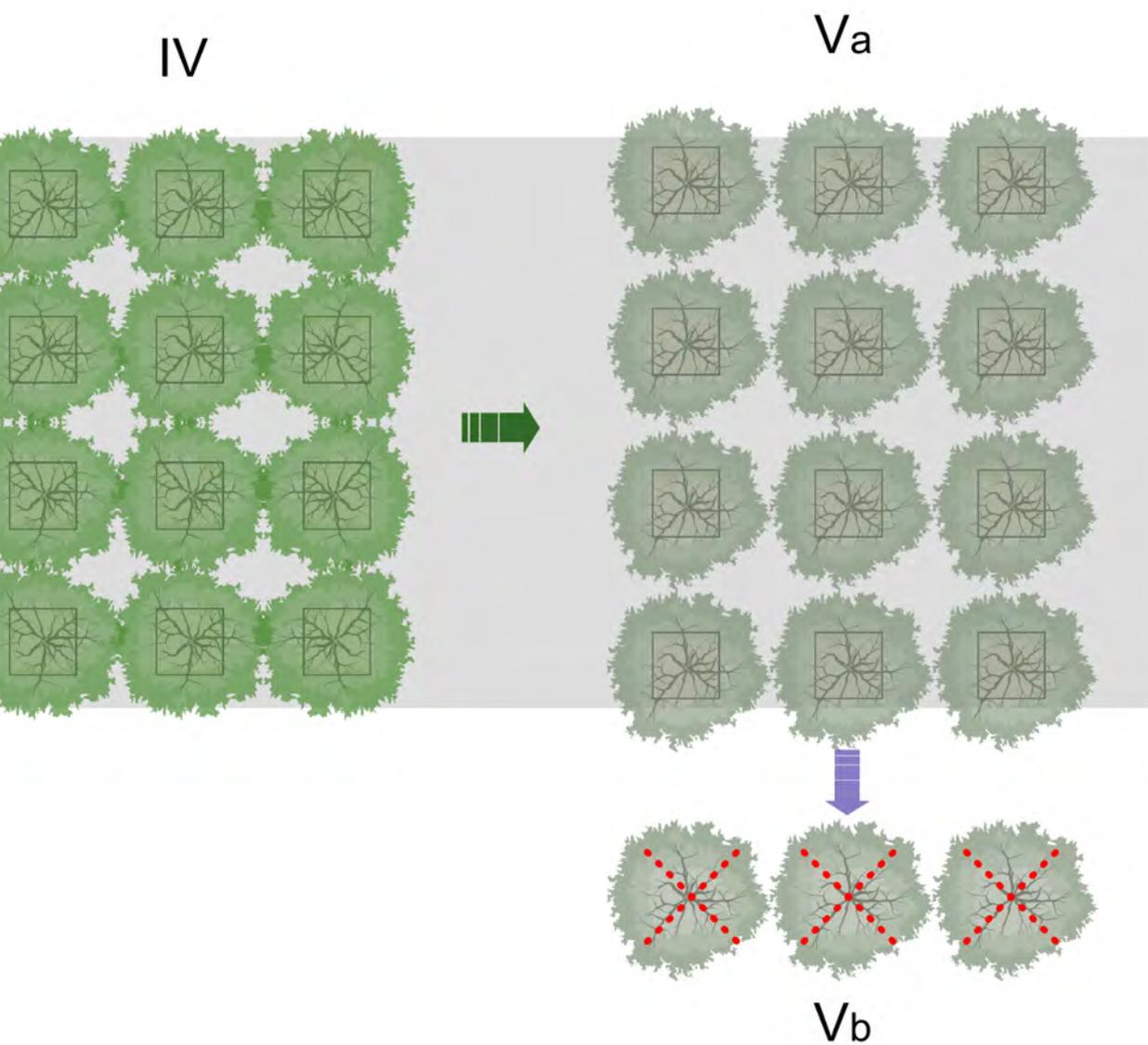
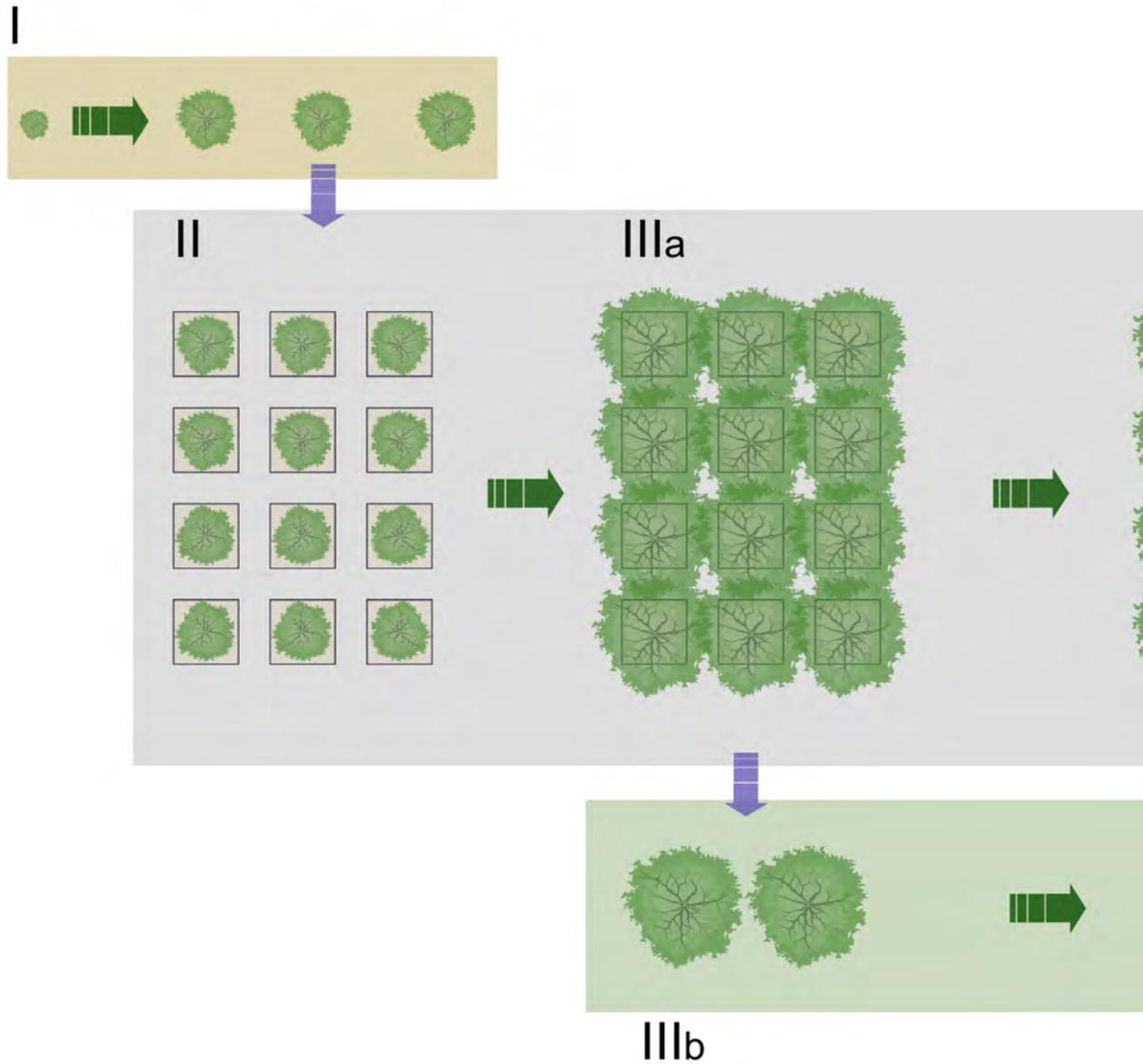


Abbildung 23: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Ausdehnen“. I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in Pflanzgefäße auf dem Projektgelände, Bäume beginnen im Pflanzgefäß zu wachsen; III: Vergrößerung der Baumkronen, Vergrößerung des Abstands zwischen den Bäumen durch Versetzen der Pflanzgefäße; IV: Wiederholung des Prozesses von III; Va: Absterben der Bäume oder Ende des Projektzeitraums, Entfernung der Bäume und Pflanzgefäße vom Projektstandort; Vb: Entsorgung der Bäume und Pflanzgefäße.

Ausdünnen

Beim Typ „Ausdünnen“ (Abbildung 24) werden viele Bäume ähnlicher Größe in einzelnen Pflanzgefäßen gepflanzt, die dicht beieinanderstehen und eine große Baumkrone bilden. Wenn die Bäume wachsen, wird das Blätterdach dichter, und die ersten Bäume können verpflanzt werden, wenn die verbleibenden für den gewünschten ästhetischen und mikroklimatischen Effekt

ausreichen. Dieser Ausdünnungsprozess kann wiederholt werden, bis die gewünschte Mindestanzahl von Bäumen erreicht ist. Je nach der geplanten Verweildauer eines Baumes im Pflanzgefäß können unterschiedliche Größen gewählt werden. Mobile Pflanzgefäße sollten für die Bäume verwendet werden, die verpflanzt werden sollen. Für die Bäume, die am Standort verbleiben, können stationäre Pflanzgefäße verwendet werden.



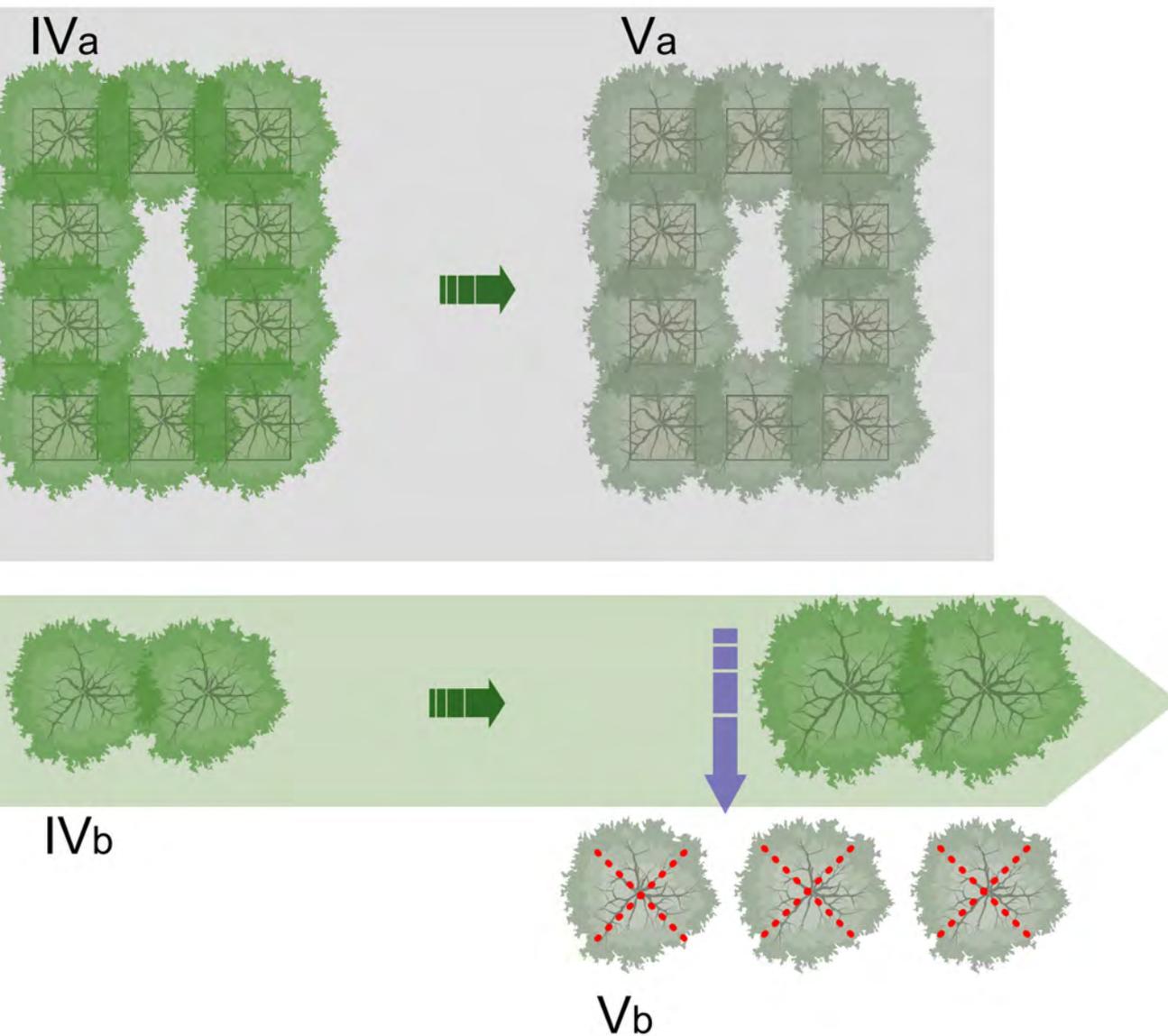


Abbildung 24: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Ausdünnen“. I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in Pflanzgefäße auf dem Projektgelände, Bäume beginnen im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: Vergrößerung der Baumkronen, Entfernung von zu dichten Bäumen; IIIb: Verpflanzung der entfernten Bäume an einen neuen Standort; IVa: Verbleibende Bäume wachsen auf dem Projektgelände weiter; IVb: Verpflanzte Bäume wachsen an ihrem neuen Standort; Va: Absterben von Bäumen oder Ende des Projektzeitraums, Entfernung von Bäumen und Pflanzgefäßen vom Projektgelände; Vb: Entsorgung von Bäumen und Pflanzgefäßen.

Überschneiden

Beim Typ „Überschneiden“ (Abbildung 25) werden Bäume in verschiedenen Wachstumsstadien verwendet. Die erste Baumgeneration wird so groß gewählt, dass sie eine unmittelbare ästhetische und mikroklimatische Wirkung hat, aber nur eine vergleichsweise kurze Lebensdauer im Pflanzgefäß zu erwarten ist. Wenn die erste Baumgeneration ihre maximale Größe im Pflanzgefäß erreicht hat, wird die zweite Baumgeneration mit jungen Bäumen in zusätzliche Pflanzgefäße gepflanzt, um die erste Baumgeneration zu ergänzen. Beide Baumgenerationen wachsen am Standort des Projekts gemeinsam, bis die erste Baumgeneration abstirbt und entfernt wird. An ihrer Stelle wird die dritte Baumgeneration gepflanzt und ergänzt die zweite Generation. Dieser Prozess kann beliebig oft wiederholt werden, so dass während des gesamten Projektzeitraums eine kontinuierliche Baumkrone mit einer schattigen Fläche entsteht.

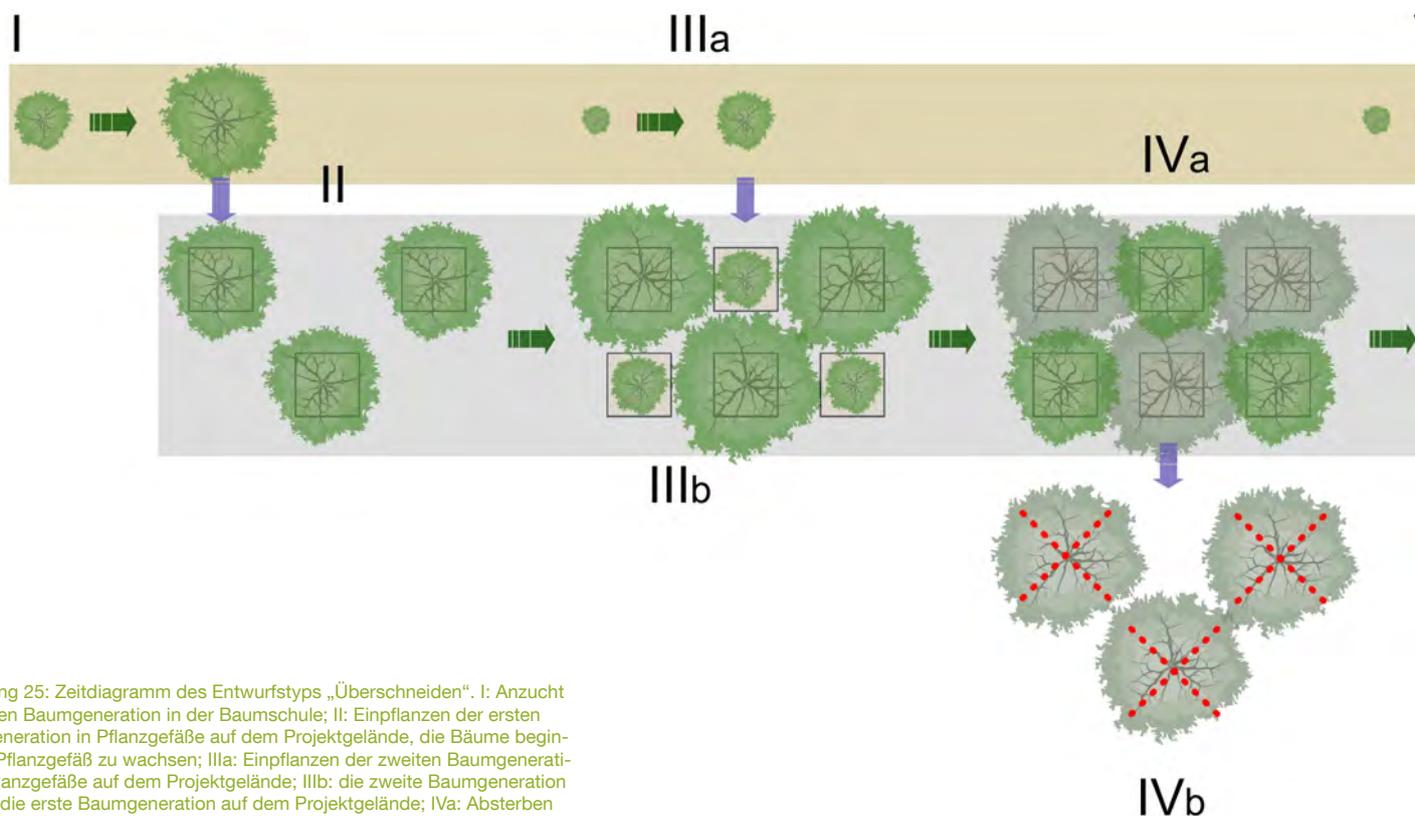


Abbildung 25: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Überschneiden“. I: Anzucht der ersten Baumgeneration in der Baumschule; II: Einpflanzen der ersten Baumgeneration in Pflanzgefäße auf dem Projektgelände, die Bäume beginnen im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: Einpflanzen der zweiten Baumgeneration in Pflanzgefäße auf dem Projektgelände; IIIb: die zweite Baumgeneration ergänzt die erste Baumgeneration auf dem Projektgelände; IVa: Absterben und Entfernen der ersten Baumgeneration; IVb: Entsorgung der ersten Baumgeneration und der Pflanzgefäße; Va: Einpflanzen der dritten Baumgeneration auf dem Projektgelände; Vb: die dritte Baumgeneration ergänzt die zweite Baumgeneration auf dem Projektgelände.

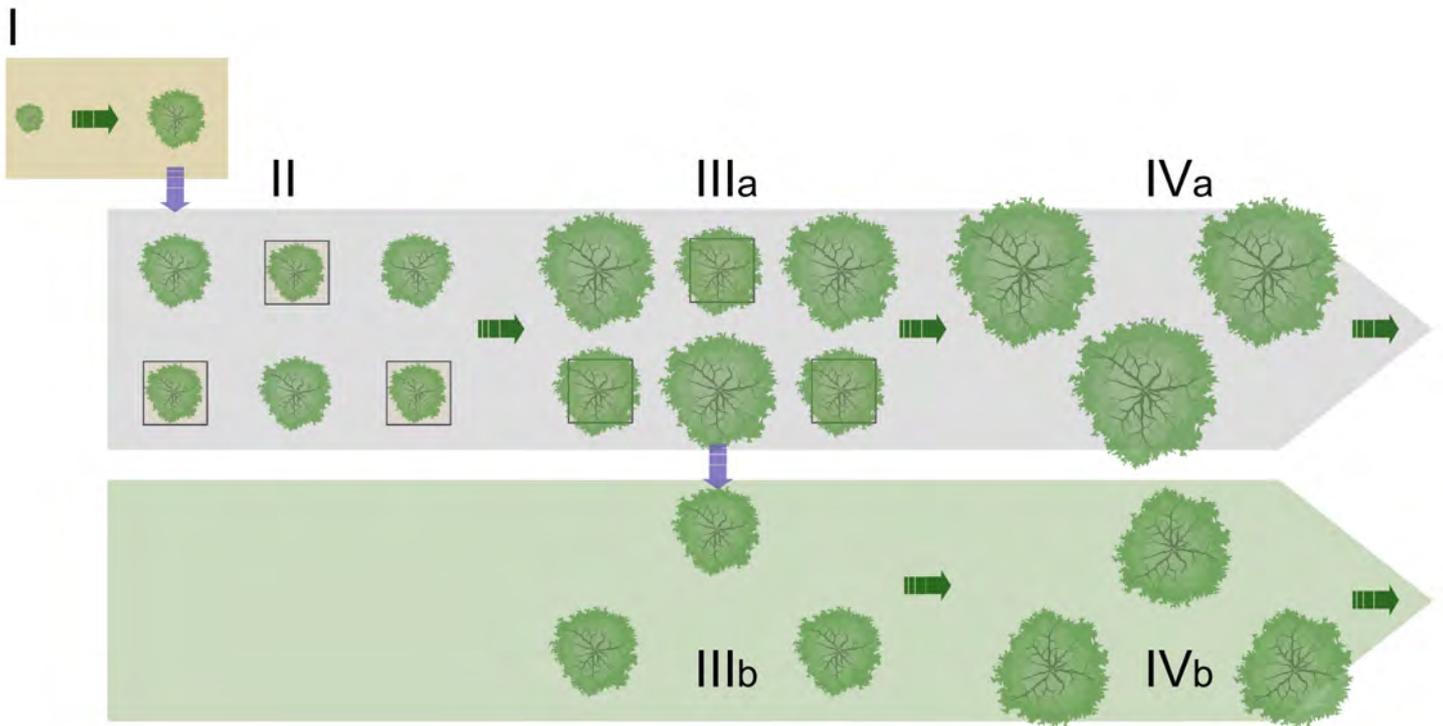
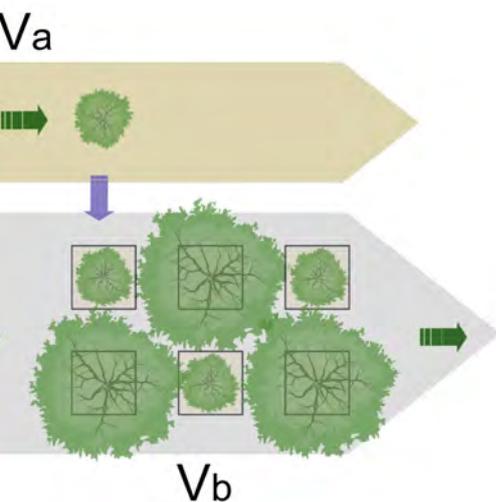
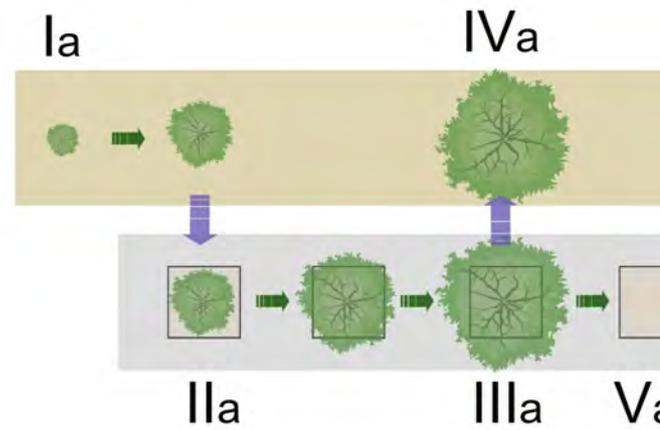


Abbildung 26: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Lücken füllen“. I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in den Boden und in Pflanzgefäße am Projektstandort, Bäume beginnen zu wachsen; IIIa: Vergrößerung der Baumkronen, Entfernung von Bäumen in Pflanzgefäßen vom Projektstandort; IIIb: Verpflanzung der entfernten Bäume an einen neuen Standort; IVa: Bäume im Boden wachsen am Projektstandort weiter; IVb: verpflanzte Bäume wachsen an ihrem neuen Standort.



Lücken füllen

Der Typ „Lücken füllen“ (Abbildung 26) zielt auf eine unmittelbare ästhetische und mikroklimatische Wirkung ab, indem kleine, frisch gepflanzte Bäume im Boden durch Bäume in Pflanzgefäßen ergänzt werden. Bäume in Pflanzgefäßen werden verwendet, um vorübergehend Lücken zwischen Bäumen zu füllen, die dauerhaft im Boden stehen. Auf diese Weise entsteht eine größere Gesamtfläche der Baumkronen. Sobald die Bäume im Boden groß genug sind, um ausreichend Schatten zu spenden, werden die Bäume in Pflanzgefäßen entfernt und in eine nahe gelegene Grünfläche verpflanzt.



Baumverleih

Mietbäume (Abbildung 27) können eine sehr ästhetische Gestaltungslösung für Veranstaltungen sein. Die Bäume werden von der Baumschule in Pflanzgefäße gepflanzt und zur Veranstaltung geliefert. Die Mietdauer kann von einigen Tagen bis zu einer ganzen Vegetationsperiode reichen. Nach der Veranstaltung werden die Bäume abgeholt und zurück in die Baumschule gebracht, wo sie gepflegt und weiterkultiviert werden, um verkauft oder an das nächste Projekt vermietet zu werden.

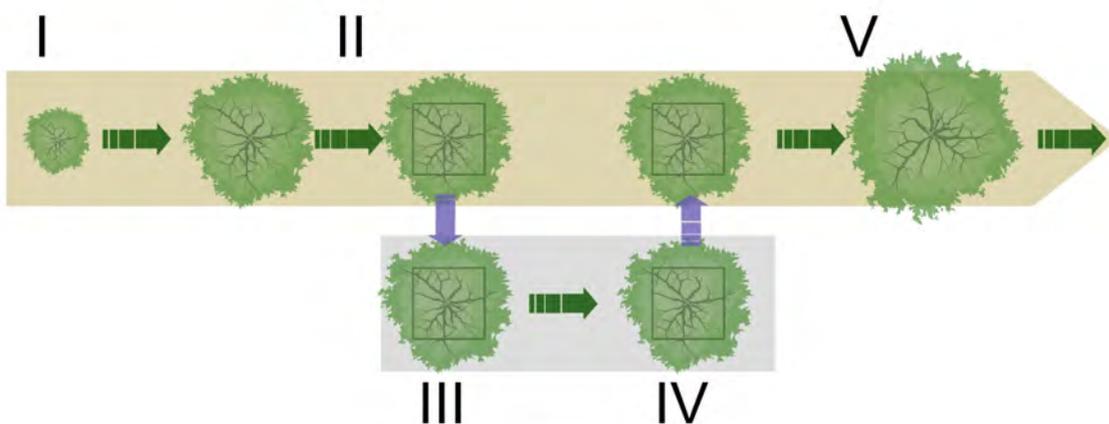


Abbildung 27: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Baumverleih“. I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in ein Pflanzgefäß in der Baumschule; III: Vermietung des Baumes im Pflanzgefäß und Transport zum Veranstaltungsort; IV: Veranstaltung beendet, Baum im Pflanzgefäß wird abgeholt und zurück zur Baumschule transportiert; V: Entnahme des Baumes aus dem Pflanzgefäß zur weiteren Kultivierung in der Baumschule.

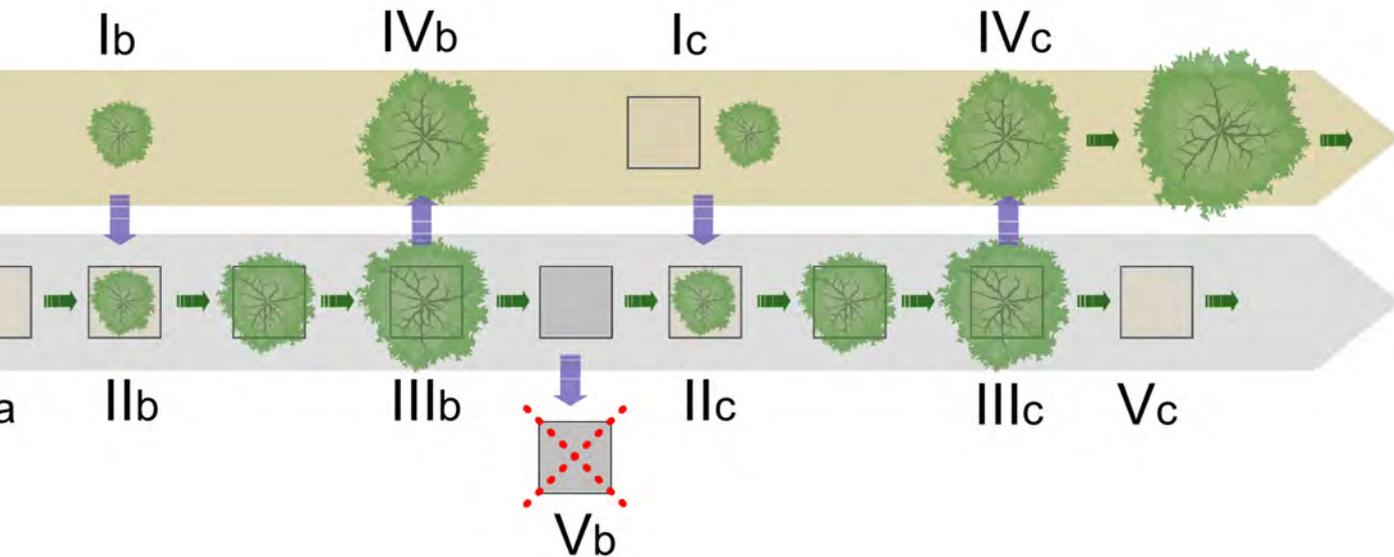


Abbildung 28: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Baumtausch“. Ia und Ib: Pflege des Baumes in der Baumschule; IIa und IIb: Einpflanzen des Baumes in ein Pflanzgefäß am Projektstandort, Baum beginnt im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa, IIIb und IIIc: Entnahme des Baumes aus dem Pflanzgefäß und Rücktransport zur Baumschule; IVa, IVb und IVc: weitere Pflege des Baumes in der Baumschule; Va und Vc: Vorbereitung des leeren Pflanzgefäßes für einen neuen Baum; Vb: das Pflanzgefäß ist nicht mehr verwendbar, Entfernung und Entsorgung des Pflanzgefäßes; Ic: Pflege des Baumes in der Baumschule und Vorbereitung eines neuen Pflanzgefäßes für den Projektstandort; IIc: Einpflanzen des Baumes in das neue Pflanzgefäß am Projektstandort, der Baum beginnt im Pflanzgefäß zu wachsen.

Baumtausch

Der Typ „Baumtausch“ (Abbildung 28) basiert auf einem regelmäßigen Baumaustausch zwischen dem Projektstandort und der Baumschule. Der Baum bleibt so lange im Pflanzgefäß auf dem Projektgelände, dass er noch gut verpflanzt werden kann. Danach wird er in die Baumschule zurückgebracht, und an seiner Stelle wird ein neuer Baum aus der Baumschule in das Pflanzgefäß gesetzt. Ein Austausch der Pflanzgefäße könnte nach mehreren Baumwechselln erforderlich werden. Dieser Vorgang kann bis zum Ende des Projektzeitraums wiederholt werden. Diese Art der Bepflanzung eignet sich für Projekte, die nicht die Möglichkeit haben, die Bäume in nahe gelegene Grünflächen zu verpflanzen, aber den Baum nicht entsorgen wollen.

Baumzwischennutzung

Die Zwischennutzung von Bäumen (Abbildung 29) ist durch die vorübergehende Verwendung eines Baumes in einem dauerhaften Projektzeitraum definiert. Es handelt sich um einen dreistufigen Prozess: Der Baum im Pflanzgefäß wird nach wenigen Jahren an seinen langfristigen Standort, z. B. in einer Grünfläche verpflanzt, während im Pflanzgefäß ein neuer Baum aus der Baumschule nachgepflanzt wird. Der Baum verbleibt im Pflanzgefäß, solange er sich noch gut verpflanzen lässt. Bei der Planung muss berücksichtigt werden, dass zum Zeitpunkt der Verpflanzung ein Platz zum Einpflanzen des Baumes und ein neuer Baum aus der Baumschule zur Verfügung stehen müssen. Nach mehreren Baumverpflanzungen könnte ein Austausch des Pflanzgefäßes erforderlich sein. Dieser Prozess kann bis zum Ende des Projektzeitraums wiederholt werden. Die räumliche Nähe der beiden Projektstandorte - der Standort für die Bäume in den Pflanzgefäßen und der Standort, der die verpflanzten Bäume aufnimmt - könnte von Vorteil sein, da sich der Baum während seiner Zeit im Pflanzgefäß akklimatisieren kann.

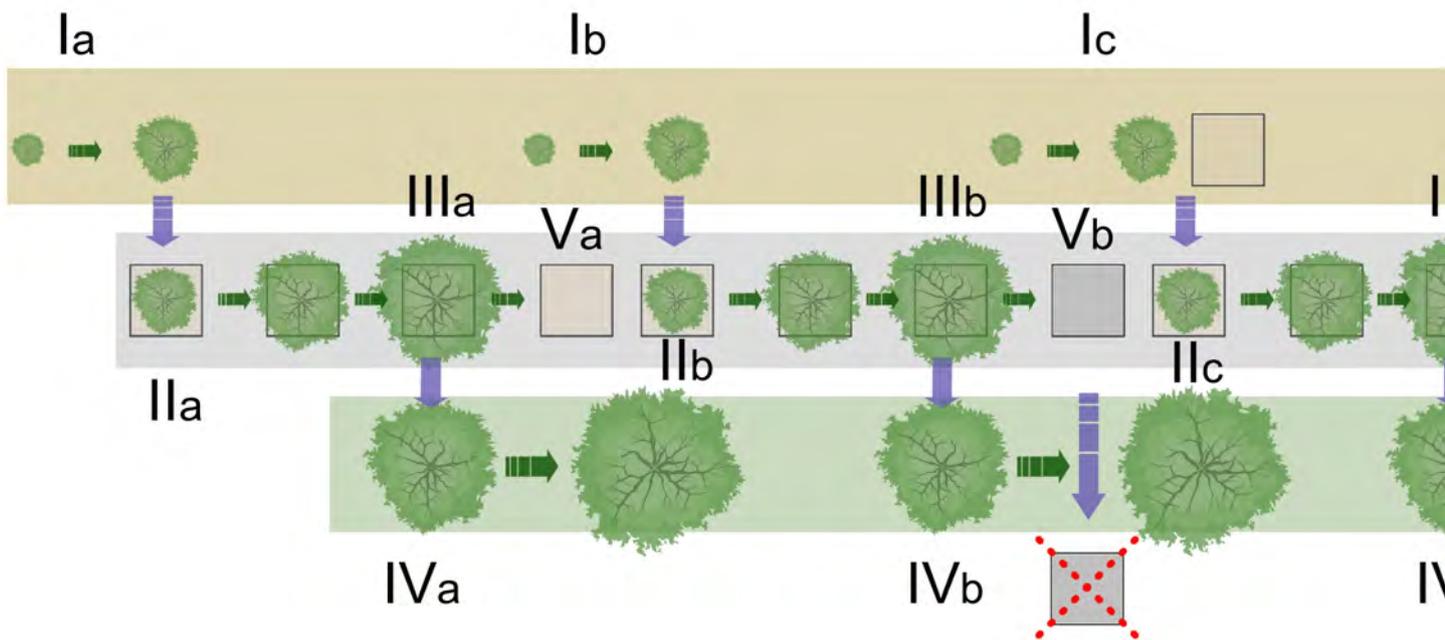


Abbildung 29: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Baumzwischennutzung“. Ia, Ib und Ic: Anzucht des Baumes in der Baumschule; IIa, IIb und IIc: Einpflanzen des Baumes in ein Pflanzgefäß am Projektstandort, Baum beginnt im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa, IIIb und IIIc: Entnahme des Baumes aus dem Pflanzgefäß; IVa, IVb und IVc: Verpflanzung des Baumes an einen neuen Standort; Va und Vc: Vorbereitung des leeren Pflanzgefäßes für einen neuen Baum; Vb: Pflanzgefäß ist nicht mehr verwendbar, Entfernung und Entsorgung des Pflanzgefäßes; Ic: Anzucht des Baumes in der Baumschule und Vorbereitung eines neuen Pflanzgefäßes für den Projektstandort; IIc: Einpflanzen des Baumes in das neue Pflanzgefäß am Projektstandort, Baum beginnt im Pflanzgefäß zu wachsen.

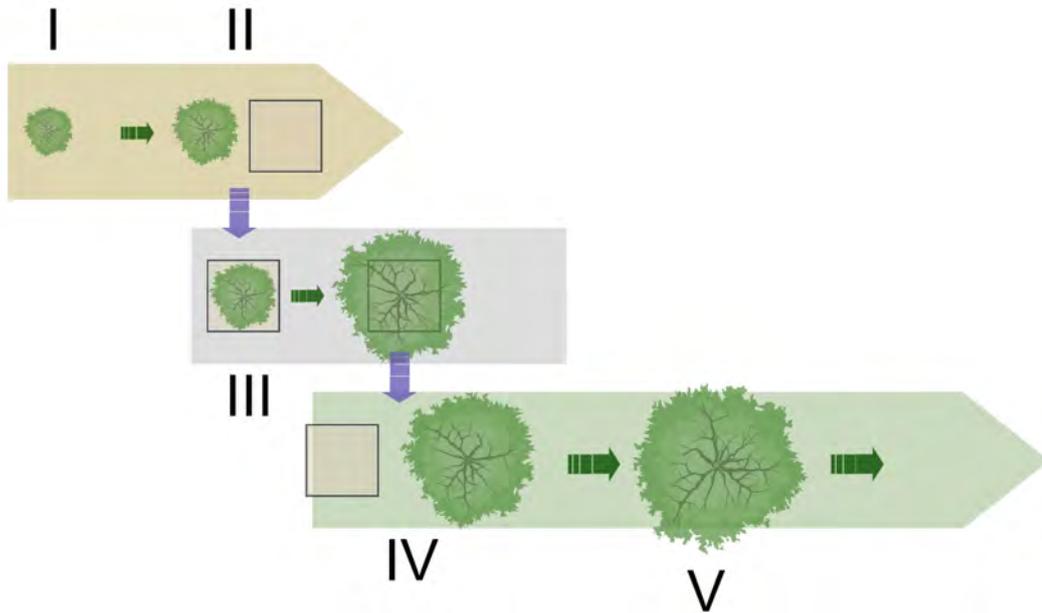
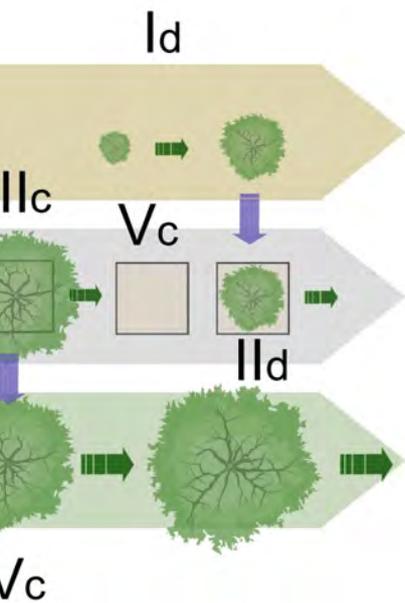


Abbildung 30: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Baumzwischenlagerung“: I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Transport von Baum und Pflanzgefäß zum Projektstandort; III: Einpflanzen des Baumes in das Pflanzgefäß am Projektstandort, der Baum beginnt im Pflanzgefäß zu wachsen; IV: Verpflanzung des Baumes an seinen endgültigen Standort, Wiederverwendung des Pflanzgefäßes an einem neuen Standort; V: Baum wächst an seinem endgültigen Standort.



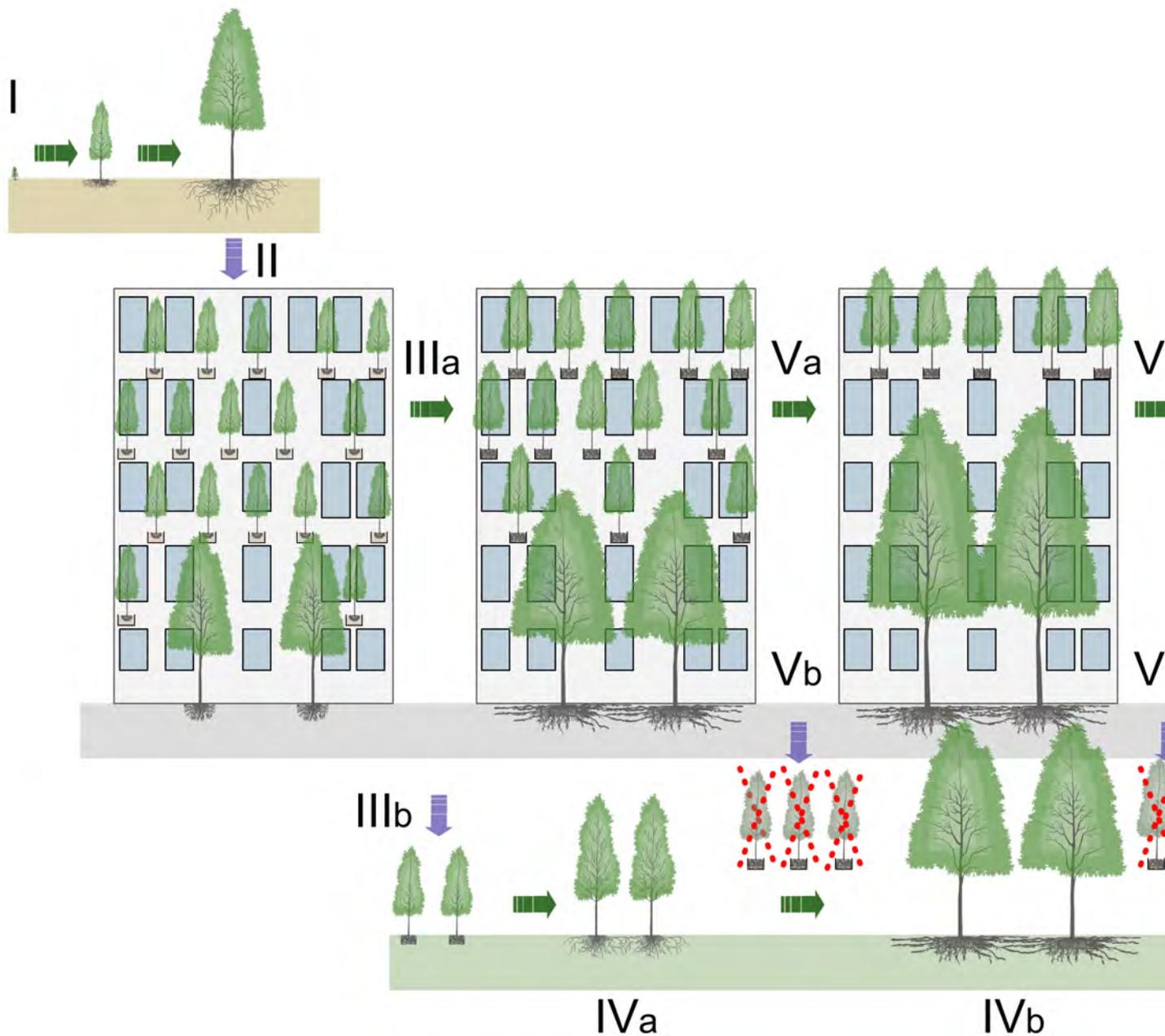
Baumzwischenlagerung

Der Typ „Baumzwischenlagerung“ (Abbildung 30) ist durch die vorübergehende Verwendung von Bäumen in einem zeitlich begrenzten Projekt definiert. Die Bäume werden auf ihrem Weg von der Baumschule zum endgültigen Standort vorübergehend zur Begrünung an einem Standort verwendet. Dies kann dazu dienen, Aufmerksamkeit für das Projekt zu erzeugen oder die Bäume bis zur Pflanzung am Bestimmungsort zwischenzulagern, was gleichzeitig der Akklimatisierung der Bäume dienen kann. Die Bäume können auch direkt am Zielort während der Bauarbeiten verwendet werden. Auf diese Weise kann der Wegfall von Parkplätzen oder die zukünftige Platzierung der Bäume simuliert werden. Die Dauer der Baumlagerung kann von einigen Monaten bis zu einigen Jahren reichen. Nachdem der Baum an seinem endgültigen Standort gepflanzt wurde, kann das Pflanzgefäß in einem neuen Projekt wiederverwendet werden.

Baumfassade

Baumfassaden [vgl. 103] werden durch die Anpflanzung von Bäumen so nah wie möglich an der Gebäudefassade auf ein oder mehreren Ebenen geschaffen. Bei diesem Typ (Abbildung 31) können Bäume in Pflanzgefäßen die Bäume im Boden ergänzen, um die Zeitspanne zu überbrücken, die die Bäume im Boden benötigen, um höhere Ebenen eines Gebäudes zu erreichen. Sobald die Bäume im Boden die nächste Ebene des Gebäudes erreicht haben, können die Bäume in Pflanzgefäßen auf

dieser Ebene entfernt werden. Wie lange die Bäume in Pflanzgefäßen an der Fassade verbleiben, hängt von der Wachstumsdynamik der Bäume im Boden ab. Daher kann es möglich sein, die Bäume, die auf den unteren Geschossebenen in den Pflanzgefäßen wachsen, an andere Standorte zu verpflanzen. Bei den Bäumen auf den höheren Geschossen könnte die Wurzelverformung bereits zu weit fortgeschritten sein, um eine erfolgreiche Verpflanzung zu ermöglichen.



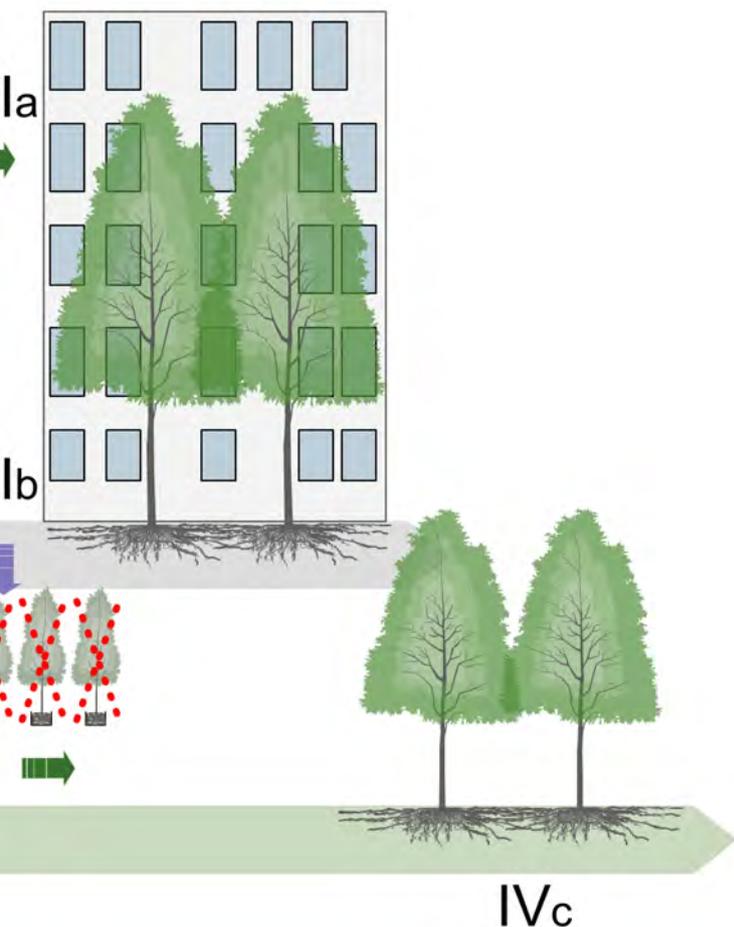


Abbildung 31: Zeitdiagramm des Entwurfstyps „Baumfassade“. I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in den Boden und in Pflanzgefäße an der Fassade am Projektstandort, Bäume beginnen zu wachsen; IIIa: Vergrößerung der Baumkronen, Überlappung der Baumkronen von Bäumen im Boden mit den ersten Bäumen an der Fassade; IIIb: Entfernung von Bäumen in Pflanzgefäßen auf den unteren Ebenen von der Fassade und Verpflanzung der entfernten Bäume an einen neuen Standort; IVa, IVb und IVc: Verpflanzte Bäume wachsen an ihrem neuen Standort; Va: Vergrößerung der Baumkronen, Überlappung der Baumkronen von Bäumen im Boden mit Bäumen auf den nächsten Ebenen an der Fassade; Vb: Entfernung und Entsorgung von Bäumen in Pflanzgefäßen an der Fassade; VIa: Vergrößerung der Baumkronen, Überlappung der Baumkronen von Bäumen im Boden mit Bäumen auf den oberen Ebenen an der Fassade; VIb: Entfernung und Entsorgung von Bäumen in Pflanzgefäßen an der Fassade.



Bäume in Pflanzgefäßen auf der Fußgängerbrücke Seoulo 7017, Seoul (Foto: Bryan, 2017)

Zusammenfassung und Ausblick



Ziel des vorliegenden Leitfadens ist es, Planenden und anderen Projektbeteiligten Handlungsempfehlungen für die Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen als Maßnahme zur Anpassung von Städten und Kommunen an die Folgen des Klimawandels zur Verfügung zu stellen. Die vorgestellten Erkenntnisse sind Ergebnis eines vierjährigen Forschungsprojekts am Zentrum für Stadtnatur und Klimaanpassung der Technischen Universität München, finanziert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. Dabei ist zunächst festzustellen, dass Bäume wo immer möglich in den Boden zu pflanzen sind, denn dies stellt fast immer die kostengünstigste, robusteste und dauerhafteste Form der Begrünung dar. Pflanzgefäße bieten jedoch interessante Optionen, um Bäume an Orten zu verwenden, bei denen durch die Nutzungsanforderungen oder baulichen Bedingungen keine Bodenpflanzung möglich bzw. sinnvoll ist. Diese häufig stark versiegelten Orte zählen oft zu den besonders ausgeprägten Hitzeinseln, wobei durch die intensive Nutzung sehr viele Menschen von den negativen gesundheitlichen Folgen wie Hitzestress betroffen sein können. Hier bieten Bäume in Pflanzgefäßen eine Antwort und stellen eine nachhaltige Lösung dar – sofern sie richtig konzipiert, geplant und gepflegt werden. Genau hier setzt der Leitfaden an, indem er vorhandenes Wissen und Zusammenhänge praxisgerecht aufarbeitet sowie Wissenslücken durch neue Versuche und Modellierungen schließt. Im Fokus stehen dabei die für die Anpassung an den Klimawandel essentiellen klimatischen Ökosystemleistungen Schatten und Verdunstungskühlung.

Kernaussagen:

- Eine regelmäßige und verlässliche Wasserversorgung, adäquate Nährstoffversorgung und strukturstabile Substrate sind essentielle Grundvoraussetzungen für eine dauerhaft gute Pflanzenentwicklung. Wassermangel kann in kürzester Zeit nachhaltige Schädigungen verursachen.
- Temperaturschwankungen im Wurzelbereich, vor allem Spitzentemperaturen über 40°C und Frost unter -5°C, können sich negativ auf die Entwicklung auswirken.
- Der wesentliche begrenzende Wachstumsfaktor für Bäume in Pflanzgefäßen ist jedoch das zur Verfügung stehende Substratvolumen. Der erreichbare Kronendurchmesser und damit die Schattenfläche und Verdunstungskühlung können durch im Rahmen des Projektes entwickelte Modellrechnungen anhand des Substratvolumens abgeschätzt werden. Beispiele:
 - Bei einem Pflanzgefäß von 2 m³ liegt der maximal mögliche Kronendurchmesser zwischen 4 und 6,5 Metern. Mit zunehmender Größe nehmen Risiken wie Schäden durch Wassermangel zu.
 - Nach 40 Jahren Wachstum ist die Verdunstungskühlung einer unter idealen Bedingungen im Boden wachsenden Platane achtmal größer als die einer in einem 2 m³ großen Pflanzgefäß wachsenden Platane. Um eine vergleichbare Klimawirkung zu erreichen, sind entsprechend viele Bäume vorzusehen.
- Die Kühlleistung durch Verdunstung je m² Kronenfläche ist etwas geringer als bei im Boden wachsenden Bäumen, jedoch hoch genug, um mikroklimatisch wirksam zu werden.
- Eine gute Wartung und Pflege vorausgesetzt liegt eine sinnvolle Annahme für die Lebenserwartung im Bereich zwischen 20 und 40 Jahren. Durch besondere Maßnahmen wie Wurzelschnitt kann dieser Wert deutlich gesteigert werden.
- Bei ausreichend dimensionierten Pflanzgefäßen kann ein Baum nach 5 bis 10 Jahren Wachstum im Gefäß noch ausgepflanzt und anderweitig verwendet werden.

- Die Konstruktion bzw. Bauweise des Pflanzgefäßes wirkt sich wesentlich auf die Vitalität, Robustheit und Langlebigkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen aus:
 - Es empfehlen sich tendenziell eher flache, sich möglichst nach unten konisch verjüngende Pflanzgefäße mit Breite-Höhe-Verhältnissen zwischen 1:1 und 6:1.
 - Eckige Formen, poröse oder geriffelte Gefäßwände vermindern Ringwurzelbildung und wirken sich damit langfristig positiv auf Wasser- und Nährstoffversorgung aus.
 - Eine Dämmung oder Beschattung der Gefäßwände und/oder eine helle Farbgebung tragen zur Vermeidung kritischer Temperaturen im Wurzelraum bei.
 - Durch in das Pflanzgefäß integrierte Wasserreservoirs können Trockenschäden vermindert und Gießintervalle verlängert werden, was das Wachstum verbessern, die Robustheit steigern und Pflegekosten senken kann.
- Bezüglich der Baumartenwahl kann auf die Erfahrungswerte in der Pflanzenverwendung (z.B. Entscheidungshilfen von Baumschulen) verwiesen werden. Die Verwendung zukunftsfähiger Arten entsprechend der Klima-Arten-Matrix wird empfohlen.
- Erfolgreiche Konzepte sind immer ganzheitlich und interdisziplinär gedacht. Sie berücksichtigen die Pflege genauso wie die Frage, was mit Baum und Pflanzgefäße am Ende der Projektlaufzeit geschehen soll. Dazu sind alle relevanten Akteure einzubeziehen: Landschaftsarchitekt:in, Architekt:in, Bauherr:in, Baumschule, Gärtner:in, Pflanzgefäßhersteller bzw. ausführende Firma.
- Nachhaltige Ansätze für Bäume in Pflanzgefäßen basieren maßgeblich auf dem Faktor Zeit. Sie berücksichtigen nicht nur das Wachstum und die begrenzte Lebenszeit der Bäume, sondern auch die des Pflanzgefäßes sowie die Zeitlichkeit des Kontexts (z.B. Nutzungszyklen von Plätzen und Gebäuden)
- Für unterschiedliche Konstellationen aus Projektzeitraum und räumlichen Kontext werden erstmalig 13 typologische Entwurfsansätze vorgestellt, die insbesondere Fragen der Dauerhaftigkeit oder Temporalität bzw. der Mobilität oder Immobilität von Bäumen in Pflanzgefäßen adressieren. Diese bilden einen Baukasten für spezifische Lösungen.

In Summe liegt damit ein Leitfaden vor, der wissenschaftlich fundiert die Praxis anleiten soll. Die Autor:innen haben dazu Wissen aus der Fachliteratur, Experteninterviews, Fall- und Entwurfsstudien und eigenen Versuchsreihen zusammengetragen. Die Laufzeit von ca. vier Jahren ermöglichte es jedoch nicht, langfristige Beobachtungen und Messungen zu machen. Es liegt also in der Natur der Sache, dass einige Erkenntnisse als provisorisch zu erachten sind und im Laufe der Zeit konkretisiert oder ggf. auch revidiert werden müssen. Der Leitfaden gibt den nach bestem Wissen und Gewissen zusammengetragenen heutigen Wissensstand wieder. Die durchgeführten Versuche sollen über den Projektzeitraum fortgeführt werden, um kontinuierlich weitere Daten zu sammeln. Neben dem konkreten Anwendungsfall von Bäumen in Pflanzgefäßen ergeben sich dadurch neue Erkenntnisse zum Wachstum von Bäumen mit eingeschränktem Wurzelraum im Allgemeinen, z.B. auf Dachgärten oder in räumlich beengten Straßensituationen mit unterirdischer Infrastruktur.

Weiterführende Information

Weitere Leitfäden des ZSK:

Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern

https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/Leitfaeden/ZSK-TP1_Leitfaden_deutsch_komprimiert.pdf

Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern

https://www.zsk.tum.de/fileadmin/w00bqp/www/PDFs/leitfaden_stadtbaeume_in_bayern_einzelseiten_web.pdf

Planungshilfen zur Baumartenauswahl:

Klima-Arten-Matrix (KLAM)

Roloff, A. Urbane Baumartenwahl im Klimawandel. In 17. Kasseler Gartenbautage, 2010.

Abkürzungsverzeichnis

BHD	Brusthöhendurchmesser, Stammdurchmesser eines Baumes auf 1,3 m
CPA	Kronenprojektionsfläche
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
UHI	Urban Heat Island, Städtischer Wärmeinseleffekt
VWC	Volumetrischer Wassergehalt in einem Substrat
ZSK	Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wachstumsdynamik des Stammdurchmessers über vier Jahre für Platane (<i>Platanus x hispanica</i>) und Winterlinde (<i>Tilia cordata</i>) in 50 L großen Pflanzgefäßen.	18
Tabelle 2:	Übersicht über die 13 identifizierten zeitabhängigen Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen und für welchen Entwurfparameter sie gelten. „+“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als vollständig geeignet für den Entwurfparameter. „o“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als geeignet mit technischen Anpassungen, z. B. wenn er auf dem Dach oder an der Fassade eines Gebäudes montiert werden soll. „-“ kennzeichnet, dass der Entwurfparameter nicht auf den zeitabhängigen Typ zutrifft.	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Oben: Zeichnung: Lumi Kirk, basierend auf U.S. EPA, 2019 unten: Zeichnung: Lumi Kirk und Christoph Fleckenstein	8
Abbildung 2:	Zeichnung: Lumi Kirk und Christoph Fleckenstein	9
Abbildung 3:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	10
Abbildung 4:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	11
Abbildung 5:	Grafik: Vjosa Dervishi	19
Abbildung 6:	Fotos: Lumi Kirk, Louis Blais und Christoph Fleckenstein	19
Abbildung 7:	Grafik: Vjosa Dervishi	20
Abbildung 8:	Grafik: Vjosa Dervishi	21
Abbildung 9:	Grafik: Christoph Fleckenstein	22
Abbildung 10:	Fotos: Christoph Fleckenstein	26
Abbildung 11:	Fotos: Christoph Fleckenstein	27
Abbildung 12:	Grafik: Vjosa Dervishi und Christoph Fleckenstein	28
Abbildung 13:	Grafik: Christoph Fleckenstein, basierend auf Mattheck [90]	29
Abbildung 14:	Grafik: Christoph Fleckenstein, basierend auf Mattheck [90]	29
Abbildung 15:	Grafik: Mohammad Rahman	34
Abbildung 16:	Grafik: Mohammad Rahman	35
Abbildung 17:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	36
Abbildung 18:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	38
Abbildung 19:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	44
Abbildung 20:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	45
Abbildung 21:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	46
Abbildung 22:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	47
Abbildung 23:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	49
Abbildung 24:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	51
Abbildung 25:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	52
Abbildung 26:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	53
Abbildung 27:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	54
Abbildung 28:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	55
Abbildung 29:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	56
Abbildung 30:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	57
Abbildung 31:	Zeichnung: Christoph Fleckenstein	59

Literaturverzeichnis

1. Lang, W.; Pauleit, S.; Brasche, J.; Hausladen, G.; Maderspacher, J.; Schelle, R.; Zölch, T. Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern: Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Klimaschutz und grüne Infrastruktur in der Stadt am Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung; Technische Universität München: München, 2017.
2. Rahman, M.A.; Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S. Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology* 2017, 232, 443–456, doi:10.1016/j.agrformet.2016.10.006.
3. Giacomello, E.; Valagussa, M. Vertical Greenery: Evaluating the High-Rise Vegetation of the Bosco Verticale, Milan; Council on Tall Buildings and Urban Habitat: Chicago, 2015.
4. Rahman, M.A.; Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* trees grown in urban conditions. *Building and Environment* 2017, 114, 118–128, doi:10.1016/j.buildenv.2016.12.013.
5. Rahman, M.A.; Moser, A.; Gold, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S. Vertical air temperature gradients under the shade of two contrasting urban tree species during different types of summer days. *Sci. Total Environ.* 2018, 633, 100–111, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.168.
6. Johnson, B. Cities, systems of innovation and economic development. *Innovation* 2008, 10, 146–155, doi:10.5172/imp.453.10.2-3.146.
7. Linke, S.; Putz, A. Die Planung einer grünen Stadt der Zukunft: Handlungsmöglichkeiten und Instrumente; Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, 2021.
8. Banihashemi, F.; Erlwein, S.; Harter, H.; Meier-Dotzler, C.; Zölch, T. Grüne und graue Maßnahmen für die Siedlungsentwicklung: Klimaschutz und Klimaanpassung in wachsenden Städten; Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, 2021.
9. Duthweiler, S.; Pauleit, S.; Rötzer, T.; Moser, A.; Rahman, M.; Stratopoulos, L.; Zölch, T. Untersuchungen zur Trockenheitsverträglichkeit von Stadtbäumen. In *Jahrbuch der Baumpflege 2017: Yearbook of Arboriculture*, 1. Auflage; Dujesiefken, D., Ed.; Haymarket Media: Braunschweig, 2017; pp 137–154, ISBN 978-3-87815-253-8.
10. Vogt, J.; Gillner, S.; Hofmann, M.; Tharang, A.; Dettmann, S.; Gerstenberg, T.; Schmidt, C.; Gebauer, H.; van de Riet, K.; Berger, U.; et al. Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. *Landscape and Urban Planning* 2017, 157, 14–25, doi:10.1016/j.landurbplan.2016.06.005.
11. Lindsey, P.; Bassuk, N. Specifying soil volumes to meet the water needs of mature urban street trees and trees in containers. *Journal of Arboriculture* 1991, 17, 141–149.
12. Fleckenstein, C.; Dervishi, V.; Rahman, M.A.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Ludwig, F. Trees in Planters—A Case Study of Time-Related Aspects. *Land* 2022, 11, 1289, doi:10.3390/land11081289.
13. Allen, K.S.; Harper, R.W.; Bayer, A.; Brazee, N.J. A review of nursery production systems and their influence on urban tree survival. *Urban Forestry & Urban Greening* 2017, 21, 183–191, doi:10.1016/j.ufug.2016.12.002.
14. Chappelka, A.H.; Freer-Smith, P.H. Predisposition of trees by air pollutants to low temperatures and moisture stress. *Environmental Pollution* 1995, 87, 105–117.
15. Gilbertson, P.; Bradshaw, A.D. TREE SURVIVAL IN CITIES: THE EXTENT AND NATURE OF THE PROBLEM. *Arboricultural Journal* 1985, 9, 131–142, doi:10.1080/03071375.1985.9746706.
16. Heidger, C. Wurzeln sind lenkbar!: Ergebnisse eines zehnjährigen Forschungsvorhabens zur Optimierung des Wurzelraumes von Bäumen in Straßen. In *20. Osnabrücker Baumpflege*, 2002.
17. Moll, G. The state of our urban forest. *American Forests* 1989, 95, 61–64.
18. Rakow, D.A. Containerized trees in urban environments. *Journal of Arboriculture* 1987, 13, 294–298.
19. Hsu, Y.M.; Tseng, M.J.; Lin, C.H. Container Volume Affects Growth and Development of Wax-apple. *HortScience* 1996, 31, 1139–1142.
20. van Dooren, N. Drawing Time: The Representation of Change and Dynamics in Dutch Landscape Architectural Practice after 1985. Dissertation; Universiteit van Amsterdam, Amsterdam, 2017.
21. Balder, H. Die Wurzeln der Stadtbäume: Ein Handbuch zum vorbeugenden und nachsorgenden Wurzelschutz; Parey: Berlin, 1998.
22. Clark, J.R.; Kjelgren, R. Water as a limiting factor in the development of urban trees. *Journal of Arboriculture* 1990, 16, 203–208.
23. Lüttschwager, D.; Atanet Alia, L.; Ewald, D. Auswirkungen von moderatem Trockenstress auf Photosynthesekapazität, Wassernutzungseffizienz und Biomasseproduktion von drei Pappelklonen. In *FastWOOD II: Züchtungen schnellwachsender Baumarten für die Produktion nachwachsender Rohstoffe im Kurzumtrieb: Erkenntnisse aus 6*

- Jahren FastWOOD Thünen Report 26; Liesebach, M., Ed.; Braunschweig, 2015; 192 - 196.
24. Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. The Urban Environment Can Modify Drought Stress of Small-Leaved Lime (*Tilia cordata* Mill.) and Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Forests* 2016, 7, 71–90, doi:10.3390/f7030071.
 25. Watson, G.W.; Hewitt, A.M.; Custic, M.; Lo, M. The management of tree root systems in urban and suburban settings: A review of soil influence on root growth. *Arboriculture & Urban Forestry* 2014, 40, 193–217.
 26. Poorter, H.; Fiorani, F.; Stitt, M.; Schurr, U.; Finck, A.; Gibon, Y.; Usadel, B.R.; Munns, R.; Atkin, O.K.; Tardieu, F.O.; et al. The art of growing plants for experimental purposes: a practical guide for the plant biologist. *Funct. Plant Biol.* 2012, 39, 821–838, doi:10.1071/FP12028.
 27. Wraith, J.M.; Wright, C.K. Soil Water and Root Growth. *HortScience* 1998, 33, 951–959.
 28. DeGaetano, A.T. Specification of soil volume and irrigation frequency for urban tree containers using climate data. *Journal of Arboriculture* 2000, 26, 142–151.
 29. Amoroso, G.; Frangi, P.; Piatti, R.; Ferrini, F.; Fini Alessio; Faoro, M. Effect of Container Design on Plant Growth and Root Deformation of Littleleaf Linden and Field Elm. *HortScience* 2010, 45, 1824–1829.
 30. Gilman, E.F.; Grabosky, J.; Stodola, A.; Marshall, M.D. Irrigation and container type impact red maple (*Acer rubrum* L.) 5 years after landscape planting. *Journal of Arboriculture* 2003, 29, 231–236.
 31. Ow, L.F.; Ghosh, S. Comparing the morphology and physiology of trees planted in containers and in-ground sites. *Arboricultural Journal* 2017, 39, 198–207, doi:10.1080/03071375.2017.1392701.
 32. Passioura, J.B. Viewpoint: The perils of pot experiments. *Funct. Plant Biol.* 2006, 33, 1075–1079, doi:10.1071/FP06223.
 33. Poorter, H.; Bühler, J.; van Dusschoten, D.; Climent, J.; Postma, J.A. Pot size matters: a meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Funct. Plant Biol.* 2012, 39, 839–850, doi:10.1071/FP12049.
 34. Amoroso, G.; Frangi, P.; Piatti, R.; Fini Alessio; Ferrini, F. Effect of Mulching on Plant and Weed Growth, Substrate Water Content, and Temperature in Container-grown Giant Arborvitae. *Horttechnology* 2010, 20, 957–962.
 35. Puértolas, J.; Larsen, E.K.; Davies, W.J.; Dodd, I.C. Applying ‚drought‘ to potted plants by maintaining suboptimal soil moisture improves plant water relations. *J. Exp. Bot.* 2017, 68, 2413–2424.
 36. Asawa, T.; Kiyono, T.; Hoyano, A. Continuous measurement of whole-tree water balance for studying urban tree transpiration. *Hydrological Processes* 2017, 31, 3056–3068, doi:10.1002/hyp.11244.
 37. Wang, H.; Ouyang, Z.; Chen, W.; Wang, X.; Zheng, H.; Ren, Y. Water, heat, and airborne pollutants effects on transpiration of urban trees. *Environ. Pollut.* 2011, 159, 2127–2137, doi:10.1016/j.envpol.2011.02.031.
 38. Neely, D.; Himelick, E.B. Fertilizing and watering trees. *Illinois Natural History Survey Circular* 1966, 52, 1–20.
 39. Kutschera, L.; Lichtenegger, E. *Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*, 2. Aufl.; Stocker: Graz, 2013, ISBN 3702009280.
 40. Wessolly, L.; Erb, M. *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*; Patzer: Berlin, Hannover, 2014, ISBN 9783876171289.
 41. Keever, G.J.; Cobb, G.S.; McDaniel, R. Effects of Container Size, Root Pruning, and Fertilization on Growth of Seedling Pecans. *Journal of Environmental Horticulture* 1986, 4, 11–13.
 42. Böll, S.; Schönfeld, P.; Körber, K.; Herrmann, J.V. *Stadt bäume unter Stress: Projekt »Stadtgrün 2021« untersucht Stadtbäume im Zeichen des Klimawandels*. LWF aktuell 2014, 98, 4–8.
 43. Graves, W.R. Urban soil temperatures and their potential impact on tree growth. *Journal of Arboriculture* 1994, 20, 24–27.
 44. Reichwein, S. *Baumwurzeln unter Verkehrsflächen: Untersuchungen zu Schäden an Verkehrsflächen durch Baumwurzeln und Ansätze zur Schadensbehebung und Schadensvermeidung*. In *Beiträge zur räumlichen Planung: Schriftenreihe des Fachbereichs Landschaftsarchitektur und Umweltentwicklung der Universität Hannover*; Institut für Grünplanung und Gartenarchitektur, Institut für Landschaftspflege und Naturschutz, Institut für Landesplanung und Raumforschung, Institut für Freiraumentwicklung und freiraumbezogene Soziologie, Eds.; Hannover, 2002.
 45. Streckenbach, M.; Schröder, K.; Bennerscheidt, C.; Stützel, T. *Wurzelwachstum von Bäumen im Visier: Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt fördert eine Versuchsanlage mit 24 Bäumen in Osnabrück*. *GaLaBau* 2010, 10, 36–40.
 46. Ronchi, C.P.; DaMatta, F.M.; Batista, K.D.; Moraes, G.A.B.K.; Loureiro, M.E.; Ducatti, C. Growth and photosynthetic down-regulation in *Coffea arabica* in response to restricted root volume. *Funct. Plant Biol.* 2006, 33, 1013–1023, doi:10.1071/FP06147.
 47. Townend, J.; Dickinson, A.L. A comparison of rooting environments in containers of different sizes. *Plant and Soil* 1995, 175, 139–146.
 48. Moore, D. *Nursery practices and the effectiveness of different containers on root development*. In *TREENET Proceedings of the 2nd National Tree Symposium: 6th & 7th September 2001*; Gardner, J., Ed.; Treenet Inc, 2001,

ISBN 0977508412.

49. NeSmith, D.S.; Duval, J.R. The effect of container size. *Horttechnology* 1998, 8.
50. Tsakalidimi, M.N.; Ganatsas, P.P. Effect of chemical root pruning on stem growth, root morphology and field performance of the Mediterranean pine *Pinus halepensis* Mill. *Scientia Horticulturae* 2006, 109, 183–189, doi:10.1016/j.scienta.2006.04.007.
51. Frangi, P.; Amoroso, G.; Piatti, R.; Robbiani, E.; Fini, A.; Ferrini, F. Effect of pot type and root structure on the establishment of *Tilia cordata* and *Ulmus minor* plants after transplanting. *Acta Hortic.* 2016, 71–76, doi:10.17660/ActaHortic.2016.1108.9.
52. Appleton, B.L. Nursery production methods for improving tree roots - an update. *Journal of Arboriculture* 1995, 21, 265–270.
53. Arnold, M.A. Mechanical Correction and Chemical Avoidance of Circling Roots Differentially Affect Post-transplant Root Regeneration and Field Establishment of Container-grown Shumard Oak. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 1996, 121, 258–263.
54. Gilman, E.F.; Forrest, M.J. Effect of Tree Size, Root Pruning, and Production Method on Root Growth and Lateral Stability of *Quercus virginiana*. *Arboriculture & Urban Forestry* 2010, 36, 281–291.
55. Gilman, E.F.; Harchick, C.; Paz, M. Effect of Container Type on Root Form and Growth of Red Maple. *Journal of Environmental Horticulture* 2010, 28, 1–7.
56. Gilman, E.F. Container types. Available online: <http://hort.ifas.ufl.edu/woody/containers-more.shtml> (accessed on 3 December 2020).
57. Bevington, K.B.; Castle, W.S. Annual root growth pattern of young citrus trees in relation to shoot growth, soil temperature, and soil water content. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 1985, 110, 840–845.
58. Kaspar, T.C.; Bland, W.L. Soil temperature and root growth. *Soil Science* 1992, 154, 290–299.
59. Öztürk, M.; Bolat, İ.; Ergün, A. Influence of air–soil temperature on leaf expansion and LAI of *Carpinus betulus* trees in a temperate urban forest patch. *Agricultural and Forest Meteorology* 2015, 200, 185–191, doi:10.1016/j.agrformet.2014.09.014.
60. *Handbuch der Pflanzenkrankheiten: Begründet von Paul Sorauer; Rademacher, B.; Richter, H., Eds., 7., vollständig neugestaltet; Paul Parey: Berlin und Hamburg, 1985.*
61. Ingram, D.L.; Ruter, J.M.; Martin, C.A. Review: Characterization and impact of supraoptimal root-zone temperatures in container-grown plants. *HortScience* 2015, 50, 530–539.
62. Zhang, H. Nutritional and temperature effects on rooting of herbaceous and softwood cuttings held in subirrigated perlite. *Retrospective Theses and Dissertations; Iowa State University, 1994.*
63. Sibley, J.L.; Ruter, J.M.; Eakes, D.J. High temperature tolerance of roots of container-grown Red Maple cultivars. In *Container-Grown Plant Production. SNA Research Conference; Bachman, G., Ed., 1999; pp 8–12.*
64. North, C.P.; Wallace, A. Soil temperature and citrus: Low soil temperature contributes to low number of roots under citrus trees in some areas of southern California. *California Agriculture* 1955, 13.
65. Martin, C.A.; Ingram, D.L.; Nell, T.A. Supraoptimal root-zone temperature alters growth and photosynthesis of holly and elm. *Journal of Arboriculture* 1989, 15, 272–276.
66. Falik, O.; Reides, P.; Gersani, M.; Novoplansky, A. Root navigation by self inhibition. *Plant, Cell and Environment* 2005, 2005, 562–569.
67. Carlson, L.W.; Endean, F. The effect of rooting volume and container configuration on the early growth of white spruce seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 1976, 6, 221–224.
68. Martin, C.A.; Ingram, D.L.; Nell, T.A. Growth and Photosynthesis of ‘Magnolia grandiflora’ ‘St. Mary’ in Response to Constant and Increased Container Volume. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 1991, 116, 439–445.
69. Chen, Y.; Wang, X.; Jiang, B.; Yang, N.; Li, L. Pavement induced soil warming accelerates leaf budburst of ash trees. *Urban Forestry & Urban Greening* 2016, 16, 36–42, doi:10.1016/j.ufug.2016.01.014.
70. Halverson, H.G.; Heisler, G.M. Soil temperatures under urban trees and asphalt. *Research Paper NE* 1981, 481, 1–6.
71. Wilkins, L.C.; Graves, W.R.; Townsend, A.M. Responses to high root-zone temperature among cultivars of Red Maple and Freeman Maple. *Journal of Environmental Horticulture* 1995, 13, 82–85.
72. Sriboon, W.; Tuntiwaranuruk, U.; Sanoamuang, N. Hourly soil temperature and moisture content variations within a concrete pipe container for planting lime trees in Eastern Thailand. *Case Studies in Thermal Engineering* 2017, 10, 192–198, doi:10.1016/j.csite.2017.06.005.
73. Whitcomb, C.E.; Whitcomb, A.C. Temperature Control and Water Conservation in Above-Ground Containers. *Proceedings of the International Plant Propagator’s Society* 2006, 56, 588–594.

74. Kuhns, M.; Teskey, R.O.; Hinckley, T.M.; Garrett, H.E. Root Growth of Black Walnut Trees Related to Soil Temperature, Soil Water Potential, and Leaf Water Potential. *Forest Science* 1985, 31, 617–629.
75. Markham, J.W.; Bremer, D.J.; Boyer, C.R.; Schroeder, K.R. Effect of Container Color on Substrate Temperatures and Growth of Red Maple and Redbud. *HortScience* 2011, 46, 721–726.
76. Ranney, T.G.; Peet, M.M. Heat Tolerance of Five Taxa of Birch (*Betula*): Physiological Responses to Supraoptimal Leaf Temperatures. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 1994, 119, 243–248.
77. Lindström, A.; Stattin, E. Root freezing tolerance and vitality of Norway spruce and Scots pine seedlings; influence of storage duration, storage temperature, and prestorage root freezing. *Canadian Journal of Forest Research* 1994, 24, 2477–2484.
78. Appleton, B.L.; Whitcomb, C.E. Effects of Container Size and Transplanting Date on the Growth of Tree Seedlings. *Journal of Environmental Horticulture* 1983, 1, 89–93.
79. Endean, F.; Carlson, L.W. The Effect of Rooting Volume on the Early Growth of Lodgepole Pine Seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 1975, 5, 55–60.
80. Rune, G. Slits in Container Wall Improve Root Structure and Stem Straightness of Outplanted Scots Pine Seedlings. *Silva Fennica* 2003, 2003.
81. Pretzsch, H. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2019, ISBN 978-3-662-58154-4.
82. Roloff, A. Urbane Baumartenwahl im Klimawandel. In 17. Kasseler Gartenbautage, 2010.
83. Moser, A.; Rötzer, T.; Pauleit, S.; Pretzsch, H. Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening* 2015, 14, 1110–1121, doi:10.1016/j.ufug.2015.10.005.
84. Bonaert, A. The Oldest Orange Trees in Containers in Europe: The Origin of Orange Trees at Freyr. In *Orangerien in Europa, Von fürstlichem Vermögen und gärtnerischer Kunst : internationale Tagung des Deutschen Nationalkomitees von ICOMOS in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis Orangerien in Deutschland e.V., der Bayerischen Verwaltung der Staatlichen Schlösser, Gärten und Seen und dem Arbeitskreis Historische Gärten der DGGL, Schloss Seehof, 29.09 - 01.10.2005*; Nationalkomitee der Bundesrepublik Deutschland, Ed.; Lipp: München, 2007; pp 93–96, ISBN 9783874906838.
85. DeGaetano, A.T.; Hudson, S.R. Specification of Soil Volume and Irrigation Frequency for Urban Trees. *J. Urban Plann. Dev.* 2000, 126, 153–165, doi:10.1061/(ASCE)0733-9488(2000)126:4(153).
86. Wrede, A. Root Pouch: kein Problem mit Ringwurzeln?: Erste Erfahrungen mit neuen Containertypen in der Baumschule. *Deutsche Baumschule* 2016, 08/2016, 51–53.
87. Biran, I.; Eliassaf, A. The effect of container size and aeration conditions on growth of roots and canopy of woody plants. *Scientia Horticulturae* 1980, 12, 385–394.
88. Wrede, A.; Ufer, T.; Averdieck, H. Root Pouch braucht den Vergleich nicht zu scheuen. *Deutsche Baumschule* 2017, 02/2017, 38–40.
89. Bunt, A.C.; Kulwiec, Z.J. The effect of container porosity on root environment and plant growth. *Plant and Soil* 1970, 65–80.
90. Mattheck, C. *Aktualisierte Feldanleitung für Baumkontrollen mit Visual Tree Assessment*, 1. Auflage; Forschungszentrum Karlsruhe: Eggenstein-Leopoldshafen, 2007, ISBN 978-3-923704-58-3.
91. Harnas, F.R.; Rahardjo, H.; Leong, E.C.; Tan, P.Y.; Ow, L.F. Stability of containerized urban street trees. *Landscape Ecol Eng* 2016, 12, 13–24, doi:10.1007/s11355-015-0272-4.
92. Tsakalimi, M.; Zagas, T.; Tsitsoni, T.; Ganatsas, P. Root morphology, stem growth and field performance of seedlings of two Mediterranean evergreen oak species raised in different container types. *Plant and Soil* 2005, 278, 85–93, doi:10.1007/s11104-005-2580-1.
93. Kowarik, I.; Bartz, R.; Brenck, M.; Hansjürgens, B. *Ökosystemleistungen in der Stadt: Gesundheit schützen und Lebensqualität erhöhen : Kurzbericht für Entscheidungsträger*; Naturkapital Deutschland - TEEB DE: Leipzig, 2017.
94. Pretzsch, H.; Biber, P.; Uhl, E.; Dahlhausen, J.; Rötzer, T.; Caldentey, J.; Koike, T.; van Con, T.; Chavanne, A.; Seifert, T.; et al. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry & Urban Greening* 2015, 14, 466–479, doi:10.1016/j.ufug.2015.04.006.
95. Lienhoop, N. *Ökosystemleistungen bewerten: Das Choice Experiment*. In *Wälder: Dritte Veranstaltung der Workshop-Reihe des Bundesamtes für Naturschutz ... 24. - 27. September 2012*, Internationale Naturschutzakademie Insel Vilm; Ring, I., Ed.; Bundesamt für Naturschutz: Bonn, 2013; pp 40–43.
96. Bolund, P.; Hunhammar, S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics* 1999, 29, 293–301.
97. Gillner, S.; Vogt, J.; Tharang, A.; Dettmann, S.; Roloff, A. Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at

- highly sealed urban sites. *Landscape and Urban Planning* 2015, 143, 33–42, doi:10.1016/j.landurbplan.2015.06.005.
98. Edmondson, J.L.; Stott, I.; Davies, Z.G.; Gaston, K.J.; Leake, J.R. Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Sci. Rep.* 2016, 6, 1–8, doi:10.1038/srep33708.
 99. Ludwig, F.; Schönle, D.; Bellers, M. *Klimaaktive baubotanische Stadtquartiere, Bautypologie und Infrastrukturen: Modellprojekte und Planungswerkzeuge*; LUBW - Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg: Stuttgart, 2014.
 100. Rötzer, T.; Reischel, A.; Rahman, M.; Pretzsch, H.; Pauleit, S. *Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern: Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Stadtbäume -Wachstum, Umweltleistungen und Klimawandel*; Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung, 2021.
 101. Dervishi, V.; Fleckenstein, C.; Rahman, M.A.; Pauleit, S.; Ludwig, F.; Pretzsch, H.; Rötzer, T. Trees in planters – Growth, structure and ecosystem services of *Platanus x hispanica* and *Tilia cordata* and their reaction to soil drought. *Urban Forestry & Urban Greening* 2023, 86, 128024, doi:10.1016/j.ufug.2023.128024.
 102. Rahman, M.A.; Fleckenstein, C.; Dervishi, V.; Ludwig, F.; Pretzsch, H.; Rötzer, T.; Pauleit, S. How good are containerized trees for urban cooling? *Urban Forestry & Urban Greening* 2023, 79, 127822, doi:10.1016/j.ufug.2022.127822.85.
 103. Köhl, F.; Burkhard, C.; Ludwig, F.; Höpfl, L.; Eisenberg, B.; Lienhard, J. *Baumfassaden als eine klimatisch wirksame, innovative Form der Bauwerksbegrünung*, 2023.



