



29. Juli 2024

Schlus sber icht

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung – Teilprojekt 9

Bäume in Pflanzgefaen als stadtklimatisch wirksame Manahme zur Anpassung an den Klimawandel

Berichtszeitraum

01.11.2019 – 31.05.2024

Projektkoordination

Prof. Dr. Ferdinand Ludwig

Projektpartner

Prof. Dr. Ferdinand Ludwig, M.A. Christoph Fleckenstein
Professur fur Green Technologies in Landscape Architecture

Prof. Dr. Thomas Rotzer, Prof. Dr. Dr. Hans Pretzsch, M.Sc. Vjosa Dervishi
Lehrstuhl fur Waldwachstumskunde

Prof. Dr. Stephan Pauleit, Dr. Mohammad A. Rahman
Lehrstuhl fur Strategie und Management der Landschaftsentwicklung



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium fur
Umwelt und Verbraucherschutz



Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	9
2. Projektziele und Arbeitspakete	12
2.1 Einleitung und Kontext	12
2.2 Fragestellungen und Ziele	13
2.3 Arbeitspakete	15
3. Arbeitspaket 1	17
3.1 Methodik	17
3.1.1 Literaturrecherche	17
3.1.2 Experteninterviews	17
3.1.3 Wachstumsversuche Versuchsreihe 1 und 2	17
3.1.4 Versuchsdesign Versuchsreihe 1	19
3.1.5 Versuchsreihe 2	24
3.1.5 Witterungsverlauf auf der Versuchsfläche	26
3.1.6 Wachstumsfaktoren Substrattemperatur und Substratfeuchte	26
3.2 Ergebnisse	27
3.2.1 Literaturrecherche	27
3.2.2 Experteninterviews	30
3.2.3 Witterungsverlauf auf der Versuchsfläche	32
3.2.4 Allgemeine Entwicklungen und Beobachtungen Versuchsreihe 1	36
3.2.5 Allgemeine Entwicklungen und Beobachtungen Versuchsreihe 2	45
3.2.6 Wachstumsfaktor Substrattemperatur	49
3.2.7 Wachstumsfaktor Substratfeuchte	54
4. Arbeitspaket 2	58
4.1 Methodik	58
4.1.1 Erfassung Baumdimensionen	58
4.1.2 Blattzählung und Berechnung der Blattfläche eines Baumes	59
4.1.3 Untersuchungen der Wurzelstrukturen und Biomassezuwachs	60
4.1.4 Messung der Baumtranspiration und Blattphysiologie	61
4.1.5 Simulationsmodell für Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen	62
4.2 Ergebnisse Baumwachstum Versuchsreihe 1	64
4.2.1 Initialwerte der Baumdimensionen	64
4.2.2 Entwicklung der Stammdurchmesser	65
4.2.3 Kronenprojektionsfläche	70
4.2.4 Blattanzahl	71
4.2.5 Blattmorphologie	74
4.2.6 Blattfläche	74

4.2.7 Biomasseentwicklung	76
4.2.8 Untersuchung der Wurzelstruktur	81
4.3 Ergebnisse Baumwachstum Versuchsreihe 2.....	83
4.3.1 Entwicklung der Stammdurchmesser	83
4.3.2 Kronenprojektionsfläche	85
4.3.3 Blattanzahl.....	86
4.3.4 Blattfläche	86
4.4 Blattphysiologie und Verdunstungsleistung der Versuchsreihe 1	87
4.4.1 Stomatäre Leitfähigkeit	88
4.4.2 Blatttranspiration	89
4.4.3 Blattwasserpotential.....	90
4.4.4 Chlorophyllkonzentration im Blatt.....	91
4.5 Simulationsmodell zu Wachstum und Ökosystemleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen....	92
4.5.1 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Platane	92
4.5.2 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Winterlinde	93
5. Arbeitspaket 3.....	94
5.1 Best-Concept-Fallstudie	94
5.2 Patentrecherche	99
5.3 Datenbank von Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen	102
5.4 Zeitabhängige Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen	104
5.4.1 Zeitabhängige Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen	106
5.5 Entwicklung Beispielentwürfe	111
5.5.1 Beispielentwürfe Entwurfseminar 1	111
5.5.2 Beispielentwürfe Entwurfseminar 2.....	114
6. Diskussion und Fazit	118
7. Publikationen, Vorträge, Studierenden- und Doktorarbeiten	120
8. Wichtige Abkürzungen und Fachbegriffe.....	121
9. Literaturverzeichnis.....	122

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Zeitplan des ZSK-Forschungsprojektes mit Meilensteinen einschließlich des Verlängerungszeitraums 01.11.2022 – 31.05.2024.	16
Abbildung 2. Übersichtskarte der Versuchsfläche im Rahmen des Projektes (rot) in Dürnast, Freising. Luftbild: Bayerische Vermessungsverwaltung, 2020	18
Abbildung 3. Lageplan der Versuchsreihe 1 + 2	18
Abbildung 4. Bemusterung wurzelnackter Pflanzware, links: <i>P. hispanica</i> STU 10/12 2xv, rechts: <i>T. cordata</i> STU 10/12 2xv	19
Abbildung 5. Aufbau Pflanzvarianten mit dargestellter Installation der verwendeten Messinstrumente	20
Abbildung 6. Aufbau Pflanzvarianten Versuchsreihe 2 mit Darstellung der Eingebauten Sensoren	24
Abbildung 7. Positionierung der Bodenfeuchtesensoren unterhalb des Wurzelstocks vor der Baumpflanzung im Frühjahr 2020. Seit Juni 2020 wurden durch Datenlogger Durchschnittswerte in 10-Minuten-Intervallen erfasst.	26
Abbildung 8. Witterungsverlauf auf der Versuchsfläche in Dürnast. Tageswerte vom 01.03.2020 bis 31.10.2020 mit Summen der Niederschläge (blau), mittlere Lufttemperatur (schwarz) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Quelle: Agrarmeteorologie Bayern, 2020	32
Abbildung 9. Witterungsverlauf für den Standort Dürnast. Tagesmittelwerte vom 01.11.2020 bis 31.10.2021 mit Niederschlägen (blau), mittlere Lufttemperatur (orange) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Datenquelle: DWD, 2021	33
Abbildung 10. Witterungsverlauf für den Standort Dürnast. Tagesmittelwerte vom 01.11.2021 bis 31.10.2022 mit Niederschlägen (blau), mittlere Lufttemperatur (orange) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Datenquelle: DWD, 2022	34
Abbildung 11. Witterungsverlauf für den Standort Dürnast. Tagesmittelwerte vom 01.11.2022 bis 31.10.2023 mit Niederschlägen (blau), mittlere Lufttemperatur (orange) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Datenquelle: DWD, 2023	35
Abbildung 12. Beispiel eines Wachstumsverlaufs von <i>T. cordata</i> in einem gedämmten Pflanzgefäß von links nach rechts: 12.05., 26.06., 30.06., 07.07., 24.07., 08.09., 08.10. und 22.10.2020	36
Abbildung 13. Beispiel eines Wachstumsverlaufs von <i>P. hispanica</i> in einem gedämmten Pflanzgefäß von links nach rechts: 12.05., 26.06., 30.06., 07.07., 24.07., 08.09., 08.10. und 22.10.2020	36
Abbildung 14. Das Bild links zeigt die Versuchsfläche am Anfang des Experimentes (Mai 2020). Das Bild rechts stellt das Wachstum der Bäume im zweiten Versuchsjahr dar (Juli 2021)	37
Abbildung 15. Beispiel des Wachstumsverlaufs von <i>T. cordata</i> in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert in der Vegetationsperiode 2021.	38
Abbildung 16. Beispiel des Wachstumsverlaufs von <i>P. hispanica</i> in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert in der Vegetationsperiode 2021	38
Abbildung 17. Das Bild links zeigt die Versuchsfläche am Anfang des Experimentes (Juni 2020). Das Bild in der Mitte stellt das Wachstum der Bäume im zweiten Versuchsjahr dar (Juli 2021) und das rechte Bild zeigt die Bäume im dritten Versuchsjahr (Juni 2022).	39
Abbildung 18. Beispiel des Wachstumsverlaufs von <i>T. cordata</i> in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2022.	40
Abbildung 19. Beispiel des Wachstumsverlaufs von <i>P. hispanica</i> in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2022.	40
Abbildung 20. Das Bild links oben zeigt die Versuchsfläche am Anfang des Experimentes (Juni 2020). Das Bild oben rechts stellt das Wachstum der Bäume im zweiten Versuchsjahr dar (Juli 2021), unten links zeigt die Bäume im dritten Versuchsjahr (Juni 2022) und unten rechts im dritten Versuchsjahr (Juni 2023).	42
Abbildung 21. Beispiel des Wachstumsverlaufs von <i>T. cordata</i> in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2023.	43
Abbildung 22. Beispiel des Wachstumsverlaufs von <i>P. hispanica</i> in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2023.	43
Abbildung 23. Wurzelflucht bei Platane im Pflanzgefäß im Boden in das angrenzende Erdreich.	44
Abbildung 24. Wachstumsentwicklung der Versuchsreihe 2. Das linke Bilde zeigt die zweite Versuchsreihe im Juni 2021 und das rechte Bild im Juni 2022.	45
Abbildung 25. Wachstumsverlauf von <i>P. hispanica</i> in der Versuchsreihe 2 in den Pflanzgefäßen von Optigrün (oben), Plantener (mitte) und nicht isolierten Pflanzgefäßen (unten) der Vegetationsperiode 2022.	46

Abbildung 26. Wachstumsentwicklung der Versuchsreihe 2. Das linke Bilde zeigt die zweite Versuchsreihe im Juni 2021 und das rechte Bild im Juni 2022	47
Abbildung 27. Wachstumsverlauf von <i>P. hispanica</i> in der Versuchsreihe 2 in den Pflanzgefäßen von Optigrün (oben), Plantener (Mitte) und nicht isolierten Pflanzgefäßen (unten) der Vegetationsperiode 2023.....	48
Abbildung 28. Maximal- und Minimalwerte der Substrattemperatur im Verlauf des Experimentes (Juni 2020 – Oktober 2023) in Dürrast bei Freising für vier Pflanzvarianten: Bäume im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Dargestellt werden tägliche Maximum- (rot), Mittel- (grün) sowie Minimumtemperaturen (blau) im Substrat.	50
Abbildung 29. Tagesmittelwerte der Substrattemperatur (°C) in ca. 25 cm Bodentiefe (s. Abbildung 2) in den Baumgruben und Pflanzgefäßen in der Messperiode 2020-21. Zu beachten: Am 18.06.2021 wurde die Trockenstressbewässerung gestartet.	51
Abbildung 30. Maximal- und Minimalwerte der Substrattemperatur im Verlauf des Experimentes (April 2021 – Oktober 2023) in Dürrast bei Freising für drei Pflanzvarianten: Optigrün, Plantener und nicht isoliertes Pflanzgefäß. Dargestellt werden tägliche Maximum- (rot), Mittel- (grün) sowie Minimumtemperaturen (blau) im Substrat.	53
Abbildung 31. Volumetrischer Wassergehalt (VWC) (%) in ca. 25 cm Bodentiefe (Abb. 2) in den Baumgruben und Pflanzgefäße, die im Sommer 2020 mit <i>T. cordata</i> (blau) und <i>P. hispanica</i> (rot) im Boden (oben links), in Pflanzgefäßen im Boden (oben rechts), nicht gedämmten (unten links) und gedämmten Pflanzgefäßen (unten rechts) bepflanzt wurden. Zudem besteht aufgrund eines spät entdeckten Stromausfalls des Dataloggers eine Datenlücke zwischen dem 2. Juli und dem 24. Juli 2020.....	54
Abbildung 32. Volumetrischer Wassergehalt (VWC) (%) in ca. 25 cm Bodentiefe in den Baumgruben und Pflanzgefäße über den Messzeitraum März 2021 bis Oktober 2023. Zu beachten: Die Wintermonate November, Dezember, Januar und Februar sind ausgeblendet, da es in den Monaten keine künstliche Bewässerung gab und somit auch keinen signifikanten Unterschied in der Bodenfeuchte.	56
Abbildung 33. Volumetrischer Wassergehalt (VWC) (%) in ca. 25 cm Bodentiefe in den Baumgruben und Pflanzgefäße über den Messzeitraum März 2022 bis Oktober 2023 in der Versuchsreihe 2. Zu beachten: Die Wintermonate November, Dezember, Januar und Februar sind ausgeblendet, da es in den Monaten keine künstliche Bewässerung gab.	57
Abbildung 34. Darstellung der gemessenen Baumdimensionen: Brusthöhendurchmesser (DBH) und Kronenprojektionsfläche (CPA). Quelle: Moser-Reischl et al., 2021.	58
Abbildung 35. Messung der Kronenschirmfläche einer Platane	59
Abbildung 36. Bestimmung der Blattfläche: Blätter von Platane (<i>P. x hispanica</i> , links) und Winterlinde (<i>Tilia cordata</i> , rechts). Das rote Rechteck dient als Flächenreferenz.	59
Abbildung 37. Freilegen der Wurzelstrukturen einer Winterlinde (<i>T. cordata</i>) im Boden durch den Einsatz von Druckluftpflanzen. (Foto: Andreas Printz).....	60
Abbildung 38. TDP-Saftflusssensoren in 0,8 - 1 m Höhe vom Boden (links). Zentraler Datalogger, der im Inneren des Schutzkastens installiert ist, um alle Saftfluss- und Bodensensoren anzuschließen (rechts).	61
Abbildung 39. Durchmesserzuwachs über die Vegetationsperiode für die Baumarten Platane und Winterlinde gepflanzt in vier Varianten: Bodenpflanzung (grün), Pflanzgefäß gedämmtn (gelb), Pflanzgefäß nicht gedämmt (blau) und Pflanzgefäß im Boden (rot).	65
Abbildung 40. Gesamtdurchmesserzuwachs der Versuchsjahre 2020 - 2023 für links: <i>P. hispanica</i> und rechts: <i>T. cordata</i> sowie die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Die Bewässerungsvarianten sind mit blau für optimal und rot für Trockenstress dargestellt.	67
Abbildung 41. Verlauf des jährlichen Stammdurchmesserzuwachses der Versuchsjahre 2020 - 2023 für links: <i>P. hispanica</i> und rechts: <i>T. cordata</i> sowie die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Die Bewässerungsvarianten sind mit durchgezogener Linie für optimal (O) und gestrichelter Linie für Trockenstress (D) dargestellt.	69
Abbildung 42. Kronenschirmfläche von Platane (links) und Winterlinde (rechts) im Versuchsjahr 2023 für die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Die Bewässerungsvarianten sind mit blau für optimal und rot für Trockenstress dargestellt.	70

Abbildung 43. Entwicklung der Blattanzahl über die Versuchsjahre 2021 bis 2023 im Boden, in Pflanzgefäßen im Boden, in nicht gedämmten und in gedämmten Pflanzgefäßen (von oben nach unten). Bei <i>T. cordata</i> sind Bäume mit Trockenstress hellblau und Bäume mit optimaler Bewässerung dunkelblau dargestellt. Bei <i>P. x hispanica</i> sind Bäume mit Trockenstress hellrot und Bäume mit optimaler Bewässerung dunkelrot dargestellt.	73
Abbildung 44. Blattgröße der Baumarten <i>P. x hispanica</i> und <i>T. cordata</i> der Versuchsreihe 1 im Vegetationsjahr 2022.	74
Abbildung 45. Mittlere Blattfläche in cm ² der Baumarten <i>P. x hispanica</i> und <i>T. cordata</i> der Versuchsreihe 1 im Vegetationsjahr 2023.	75
Abbildung 46. Zuwachs an holziger Biomasse (Äste, Stamm und Wurzeln) bei Bäumen (Platane und Winterlinde) in verschiedenen Pflanzvarianten. Diese wurde im Frischgewicht in Kilogramm vor der Pflanzung im Jahr 2020 gemessen und nach der Ernte im Jahr 2023 erneut erfasst.	77
Abbildung 47. Darstellung der Gesamttrockenmasse der holzigen Biomasse der Bäume nach der Ernte im Herbst 2023, gemessen in Kilogramm (kg). Links für <i>P. hispanica</i> und rechts für <i>T. cordata</i>	78
Abbildung 48. Trockengewicht in kg der Wurzelbiomasse von <i>P. hispanica</i> links und <i>T. cordata</i> rechts unterteilt in Grob- (oben) und Feinwurzeln (unten).	79
Abbildung 49. Trockengewicht in kg der gesamten Wurzelbiomasse (Fein- und Grobwurzeln) für <i>P. hispanica</i> links und <i>T. cordata</i> rechts.	80
Abbildung 50. Links: Freigelegte Wurzeln einer Platane, die frei im Boden gewachsen ist. Rechts: freigelegte Wurzeln einer Winterlinde, die frei im Boden gewachsen ist. Zur besseren Erfassung der Wurzelstruktur wurden die Wurzeln mit Markierungsspray orange eingefärbt.	81
Abbildung 51. 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 erkennbar.	82
Abbildung 52. Links: Wurzelteppich aus Ringwurzeln einer Platane nach vier Jahren in einem glattwandigen Pflanzgefäß. Mitte: Freigelegte Wurzelstruktur einer Platane und rechts einer Winterlinde nach vier Jahren in einem glattwandigen Pflanzgefäß. Es ist deutlich erkennbar, dass die Wurzeldeformierung die gesamte Wurzelstruktur betrifft.	82
Abbildung 53. Gesamtdurchmesserzuwachs in cm für Platanen in Versuchsreihe 2 über den Versuchszeitraum 2021 - 2023.	83
Abbildung 54. Verlauf der jährlichen mittleren Zuwachsrate des Stammdurchmessers in cm für Platanen in der Versuchsreihe 2.	84
Abbildung 55. Mittelwerte der Kronenprojektionsfläche in m ² für Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün (grau), Plantener (gelb) und nicht gedämmten Pflanzgefäßen (blau) im Versuchsjahr 2023.	85
Abbildung 56. Entwicklung der Blattanzahl der Versuchsreihe 2 über den Versuchszeitraum 2021 bis 2023 von <i>P. hispanica</i> in nicht isolierten Pflanzgefäßen, Pflanzgefäßen von Plantener und Optigrün.	86
Abbildung 57. Blattfläche in cm ² der Platanen in der Versuchsreihe 2 in Pflanzgefäßen von Optigrün (grau), Plantener (gelb) und nicht gedämmten Pflanzgefäßen (blau) im Versuchsjahr 2023.	87
Abbildung 58. Mittelwert und Standardabweichung der stomatären Leitfähigkeit von <i>P. hispanica</i> (oben) und <i>T. cordata</i> (unten) im Juni, Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.	88
Abbildung 59. Mittelwert und Standardabweichung der Kühlleistung durch Blattverdunstung von <i>P. hispanica</i> (oben) und <i>T. cordata</i> (unten) im Juni, Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.	89
Abbildung 60. Mittelwerte und Standardabweichung des mittäglichen Blattwasserpotentials von <i>P. hispanica</i> (oben) und <i>T. cordata</i> (unten) im Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.	90
Abbildung 61. Mittelwerte und Standardabweichung der Chlorophyllkonzentration in den Blättern von <i>P. hispanica</i> (oben) und <i>T. cordata</i> (unten) im Juni, Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.	91

Abbildung 62. 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.	92
Abbildung 63. 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.	93
Abbildung 64. Zeitdiagramm des Tour de la biodiversité.	94
Abbildung 65. Zeitdiagramm des Bosco Verticale.	95
Abbildung 66. Zeitdiagramm der Brown Hart Gardens.	96
Abbildung 67. Zeitdiagramm des Innenhofes der Stadthalle Posen.	97
Abbildung 68. Zeitdiagramm der Orangerie des Schlosses Freyr.	98
Abbildung 69. Prozentualer Anteil von vitalitätsfördernder Pflanzgefäßeigenschaften in den ausgewerteten Patenten. Aufgeschlüsselt nach Zielgruppen: Krautige Gewächse / Gehölze (Blau), Krautige Gewächse (Orange) und Gehölze (Grün).	101
Abbildung 70. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Standard". I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in die Pflanzgefäße 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.	106
Abbildung 71. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Pflanzgefäßgesellschaft". I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in die Pflanzgefäße am Projektstandort, Bäume beginnen im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: im Falle des Absterbens eines Baumes Entfernung des toten Baumes aus dem Pflanzgefäß, gesunder Baum wächst im Pflanzgefäß weiter; IIIb: Entsorgung des toten Baumes.	107
Abbildung 72. 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.	108
Abbildung 73. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Baumverleih". I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in eine Pflanzschale in der Baumschule; III: Vermietung des Baumes in der Pflanzschale und Transport zum Veranstaltungsort; IV: Veranstaltung beendet, Baum in der Pflanzschale wird abgeholt und zurück zur Baumschule transportiert; V: Entnahme des Baumes aus der Pflanzschale zur weiteren Anzucht in der Baumschule.	109
Abbildung 74. 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 an; 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; Vlb: Entfernung und Entsorgung von Bäumen in Pflanzgefäßen an der Fassade.	110
Abbildung 75. Überblick der Beispielentwürfe des Entwurfsseminars 1. Die Buchstaben in der Abbildung und Tabelle 16 stehen für das gleiche Studierendenteam.	112
Abbildung 76. Überblick Teil 1 der Beispielentwürfe des Entwurfsseminars 2. Die Buchstaben in der Abbildung und Tabelle 17 stehen für das gleiche Studierendenteam.	115
Abbildung 77. Überblick Teil 2 der Beispielentwürfe des Entwurfsseminars 2. Die Buchstaben in der Abbildung und Tabelle 17 stehen für das gleiche Studierendenteam.	117

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Übersicht der angefragten und geführten Experteninterviews	30
Tabelle 2. Übersicht der Dimensionen und Gewichte von Platane und Winterlinde zur Zeit der Pflanzung Anfang März (04.03. - 11.03.2020). Dargestellt sind Mittelwert \pm Standardabweichung.....	64
Tabelle 3. Initialwerte über die Dimensionen der Baumarten Platane und Winterlinde und deren Pflanzvarianten, gemessen während der Pflanzzeit 04.03. - 11.03.2020 mit Mittelwert \pm Standardabweichung. Gewicht entspricht dem Baumfrischgewicht unmittelbar vor der Pflanzung, Brusthöhendurchmesser ist auf 1,3 Meter Höhe gemessen, Kronenprozent entspricht den prozentualen Anteil der Krone an Gesamtbaumhöhe.	64
Tabelle 4. Gesamtdurchmesserzuwachs in mm für den Zeitraum von 2020 bis 2023 bei Platane und Winterlinde in drei verschiedenen Topfvarianten und unter zwei Bewässerungsarten, mit Angaben zu Mittelwerten (MW), Standardabweichung (SD), sowie Minima und Maxima.....	66
Tabelle 5. Mittelwerte der Entwicklung des jährlichen Stammdurchmesserzuwachses in mm für Platane und Winterlinde in vier verschiedenen Pflanzungsvarianten und unter zwei Bewässerungsarten.	68
Tabelle 6. Kronenschirmfläche (Schattenfläche in m ²) im Versuchsjahr 2023 bei Platanen und Winterlinden für die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI) und Bewässerungsarten optimal und trocken. Dargestellt sind Mittelwerte (MW), Standardabweichungen (SD), Minima (Min) und Maxima (Max).	71
Tabelle 7. Ermittelte Messwerte der Biomasse in kg ausgewählter Bäume der Versuchsreihe 1	77
Tabelle 8. Gesamtdurchmesserzuwachs in cm für Platanen in Versuchsreihe 2 über den Versuchszeitraum 2021 - 2023. Dargestellt sind Mittelwerte (MW), Standardabweichungen (SD), Minima (Min) und Maxima (Max).....	83
Tabelle 9. Jährliche mittlere Zuwachsrate des Stammdurchmessers in cm für Platanen in der Versuchsreihe 2.	84
Tabelle 10. Kronenprojektionsfläche in m ² für Platanen in der Versuchsreihe 2	85
Tabelle 11. Ergebnisse der Stichwortsuche in der Datenbank des Europäischen Patentamts	99
Tabelle 12. Patente mit vier von fünf vitalitätsfördernden Pflanzgefäßbeigenschaften	100
Tabelle 13. Patente mit drei von fünf vitalitätsfördernden Pflanzgefäßbeigenschaften.....	100
Tabelle 14. Liste von Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen mit Baujahr zwischen 1970 und 1990.	102
Tabelle 15. Übersicht der 13 identifizierten Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen und für welchen Entwurfparameter sie gelten. „X“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als vollständig geeignet für den Entwurfparameter. „0“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als geeignet mit technischen Anpassungen, z. B. wenn er auf dem Dach oder an der Fassade platziert werden soll. „-“ kennzeichnet, dass der Entwurfparameter nicht auf den zeitabhängigen Typ zutrifft.	105
Tabelle 16. Übersicht über die Beispielentwürfe des Entwurfseminars 1	111
Tabelle 17. Übersicht über die Beispielentwürfe des Entwurfseminars 2.....	114

1. Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht stellt die Ziele, Vorgehensweisen und Ergebnisse des ZSK-Forschungsprojektes „Bäume in Pflanzgefäßen als stadtklimatisch wirksame Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel“ vor. Das Forschungsprojekt verfolgte das Ziel, bestehende Wissenslücken zu den Wachstumsbedingungen von Bäumen in Pflanzgefäßen und ihren klimatischen Wirkungen zu schließen. Die Ergebnisse wurden in einem Leitfaden zusammengefasst, der es bayerischen Städten und Kommunen erlaubt, Bäume in Pflanzgefäßen zielgerichtet und nachhaltig als Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel und zur Steigerung der Biodiversität in dicht bebauten Stadtquartieren einzusetzen.

Der Bericht ist nach den drei Arbeitspaketen 1. „Wachstumsfaktoren von Bäumen in Pflanzgefäßen“ 2. „Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen und deren Modellierung“ und 3. „Zeitbasierte Entwurfstypologien zur Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen“ gegliedert.

Die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 und 2 umfassen die gewonnenen Erkenntnisse aus zwei Versuchsreihen zur Untersuchung der Wachstumsdynamik und der Ökosystemleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen. Die Versuchsdauer war für Versuchsreihe 1 vier Vegetationsperioden von 2020 bis 2023 bzw. 3 Vegetationsperioden für Versuchsreihe 2 von 2021 bis 2023.

Im Arbeitspaket 1 wurde in zwei Versuchsreihen der Einfluss der Wachstumsfaktoren Wasserversorgung und Substrattemperatur untersucht. Dabei wurde deutlich, dass die Wasserversorgung der deutlich wichtigere Wachstumsfaktor ist als die Substrattemperatur im Wurzelbereich eines Baumes. Bäume mit Trockenstress in Pflanzgefäßen zeigten deutlich verringerte Zuwächse im Stammdurchmesser als solche mit optimaler Wasserversorgung. Zudem zeigten die Versuche, dass die Reaktion auf Trockenstress Abhängig von der jeweiligen Baumart ist. In Bezug auf die Substrattemperatur konnten keine signifikanten Wachstumsunterschiede festgestellt werden. Es wurde jedoch ein signifikanter Einfluss wärmegeprägter Pflanzgefäße auf die Substrattemperatur gemessen. So kann ein Pflanzgefäß mit Wärmedämmung extreme Temperaturbereiche im Substrat verhindern und somit dazu beitragen, dass besonders Bäume in Pflanzgefäßen an sonnenexponierten Standorten in einem verträglichen Substrattemperaturbereich bleiben.

Eine ausführliche Literaturrecherche zu Bäumen in Pflanzgefäßen gibt einen Überblick über den aktuellen Stand in der Forschung und welche weiteren Wachstumsfaktoren, im Besonderen die Beschaffenheit des Pflanzgefäßes, signifikanten Einfluss auf das Wachstum und die Vitalität von Bäumen in Pflanzgefäßen haben. Experteninterviews wurden durchgeführt, um die Wissenslücke zwischen Forschung und Praxis zu schließen und anhand der Praxiserfahrungen der Experten plausible Rückschlüsse auf die Langlebigkeit und den Pflegeaufwand von Bäumen in Pflanzgefäßen zu treffen.

Im Arbeitspaket 2 wurde das Wachstum und die Ökosystemleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen untersucht und anhand der gewonnenen Erkenntnisse eine erste Modellierung dazu aufgestellt. Aus den Ergebnissen der Versuchsreihen 1 und 2 geschlossen werden, dass die Ausprägung der Reaktion auf Trockenstress nicht nur im Wachstum artenspezifisch ist, sondern wirkt sich auch auf die Ökosystemleistung eines Baumes aus. Im Speziellen wurden die Kühlleistung durch Verdunstung und die verschattete Fläche durch die Baumkrone als maßgebliche Faktoren zur Kühlung des Mikroklimas ermittelt. Unsere Ergebnisse zeigen, dass Bäume in Pflanzgefäßen durch ihre Kühlleistung durch Verdunstung und Verschattung einen signifikanten Einfluss auf das Mikroklima einer hochversiegelten und dicht bebauten räumlichen Situation haben können. Da der begrenzte Wurzelraum in einem Pflanzgefäß es nicht ermöglicht, dass der Baum in der Regel seine natürliche maximal mögliche Größe erreicht, ist der Kühleffekt durch Verschattung geringer zu bewerten als durch Verdunstung.

Je nach Baumart und Pflanzgefäßgröße, kann somit über einen Betrachtungszeitraum von 40 Jahren ein Baum im Boden eine bis zu 8-mal größere Kühlleistung erreichen als ein Baum im Pflanzgefäß.

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 wurden eine Best-Concept-Studie und eine Datenbank von langjährigen Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen erstellt sowie eine Patentrecherche zu Pflanzgefäßen und zwei Entwurfsseminare durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen 1 und 2 sowie der genannten Arbeiten im Arbeitspaket 3 dienen als Grundlage für die Entwicklung einer zeitabhängigen Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen. In der Best-Concept-Studie wurden die Entwurfskonzepte von fünf Projekten, die Bäume in Pflanzgefäßen verwenden, analysiert. Der Fokus lag besonders die Kommunikation von zeitlichen Aspekten (Lebensdauern von Baum, Raum und Pflanzgefäß sowie die zeitliche Interaktion von den involvierten Akteur:innen) im Konzept sowie der Umgang mit diesen in der Umsetzung der Projekte. Die Studie zeigte auf, dass häufig nur eine unzureichende Berücksichtigung und somit Kommunikation der zeitlichen Aspekte im Entwurfskonzept stattfindet. Daraus resultiert eine Diskrepanz zwischen dem Projektziel und der tatsächlichen Umsetzung. In der Patentrecherche wurde eine umfassende Analyse der Datenbank des europäischen Patentamts durchgeführt und ermittelt, welche Pflanzgefäßtypen es gibt und wie diese versuchen ein möglichst optimalen Wurzelraum für Pflanzen zu schaffen. Nur wenige Pflanzgefäße berücksichtigen dabei die Integration von vitalitäts- und wachstumsfördernden Maßnahmen. Die Datenbank von langjährigen Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen umfasst einige Projekte aus dem süddeutschen Raum, die teilweise schon über 40 Jahre Bäume in Pflanzgefäßen verwenden. Aus den gewonnenen Erkenntnissen dieser Projektanalyse konnten weitere Rückschlüsse auf die Langlebigkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen getroffen werden. In zwei studentischen Entwurfsseminaren wurden 13 Beispielentwürfe an unterschiedlichen Orten für Bäume in Pflanzgefäßen erarbeitet. Die 13 Beispielentwürfe zeigen plausible Möglichkeiten wie Bäume in Pflanzgefäßen als alternative Begrünungslösung eingesetzt werden kann.

Abschließend wird die entwickelte zeitabhängige Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen vorgestellt und damit auf die Herausforderungen der Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen in der Planung eingegangen. Die Kernerkenntnisse aus diesem Entwicklungsprozess sind, dass erfolgreiche Konzepte immer ganzheitlich und interdisziplinär gedacht sind. Sie berücksichtigen die Pflege genauso wie die Frage, was mit Baum und Pflanzgefäß 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 räumlichem 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.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die Wachstumsdynamik der jeweiligen Baumart einen größeren Einfluss auf die Trockenstressreaktion, da eine schnellwüchsige Baumart wie Platane den verfügbaren Wurzelraum in einem Pflanzgefäß tendenziell schneller vollständig durchwurzelt als eine langsam wachsende Baumart wie Winterlinde. Dies führt dazu, dass die schnellwüchsige Baumart früher durch den begrenzten Wurzelraum in einem Pflanzgefäß im Wachstum limitiert wird und somit früher auf Trockenstress reagiert. Unsere Ergebnisse deuten jedoch darauf hin, dass es der Kombination von Trockenheit und Hitze bedarf, um einen deutlichen Unterschied zwischen Platane und Winterlinde in Bezug auf Wasserbedarf und der Reaktion auf Trockenstress beobachten zu können. Die Untersuchungen der

Wurzelstrukturen verdeutlichen die unterschiedliche Wachstumsdynamik von Platane und Winterlinde. Zudem wurde festgestellt, dass die Wasserversorgung einen deutlich größeren Einfluss auf das Baumwachstum hat als die Substrattemperatur.

Die Kühlleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung kann als signifikant für die mikroklimatische Kühlung bewertet werden kann. Auch die erreichte Kronenprojektionsfläche ist im Verhältnis zur Pflanzgefäßgröße als signifikant für mikroklimatische Kühlung zu bewerten, da sie deutlich über den Bereich des Pflanzgefäßes hinausreicht und somit kühle Plätze an heißen Sommertagen unter der Baumkrone entstehen, die das Potential für einen angenehmen Aufenthaltsort für Menschen haben.

Mit unserer neu entwickelten zeitabhängigen Entwurfstypologie mit 13 Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäße wollen wir die noch große Lücken bezüglich des Wachstums und dem möglichen Ausfall von Bäumen in Pflanzgefäßen in den Vegetationskonzepten und gestalterischen Entwürfen von Projekten schließen. Damit möchten wir die bisherigen eher technischen Lösungen zu Problemen von Bäumen in Pflanzgefäßen um gestalterisch-konzeptionell Lösungen erweitern. Daher sehen wir die Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt als große Bereicherung für Planer:innen bei der Umsetzung zukünftiger Projekte mit Bäumen in Pflanzgefäßen, die maßgeblich dazu beitragen können Vorbehalte zur Sinnhaftigkeit der Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen in dichten und hochgradig versiegelten urbanen Räumen abzubauen. Wir möchten jedoch zu keinem Zeitpunkt suggerieren, dass Bäume in Pflanzgefäße eine Lösung sind, die Planer:innen von der Verantwortung befreien, eine gute Stadtplanung mit großzügigen Grünflächen und einer Vielzahl an Bäumen im Boden zu entwickeln. Denn unsere Ergebnisse belegen eindeutig, dass Bäume in Pflanzgefäße nur dann eine Alternative zu Bäumen in Pflanzgefäßen sind, wenn sie dort eingesetzt werden, wo keine Bäume in den Boden gepflanzt werden können. Bäume in Pflanzgefäßen stellen somit nur eine sinnvolle Ergänzung zu Bäumen im Boden dar, aber keinen 1zu1 Ersatz.

2. Projektziele und Arbeitspakete

2.1 Einleitung und Kontext

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

Das Forschungsprojekt hat als Ziel Lösungsansätze für die erfolgreiche Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen zu entwickeln und das Wachstumsdynamik sowie die Ökosystemleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen zu ermitteln. Im Laufe des Forschungsprojektes wurde deutlich, dass bei der Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen und um deren positiven Ökosystemleistungen optimal auszuschöpfen, die Berücksichtigung der genannten zeitlichen Aspekte wie Wachstum, Absterben von Pflanzenteilen oder ganzen Pflanzen, Wachstumsreaktionen auf Umweltfaktoren wie Wind, Konkurrenz um Licht und Ressourcen, mechanische Verletzungen etc. in der Planung notwendig ist. Unsere Projektanalysen zeigen, dass hier noch starker Aufklärungsbedarf vorhanden ist [12].

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 auf planerischer Ebene die Wachstumsdynamiken von Pflanzen, im speziellen von Bäumen, im Entwurf stärker in den Fokus rücken. Oft wird hier noch nach dem Prinzip „Hoffnung“ gehandelt, dies reicht jedoch in den seltensten Fällen aus, um die Ziele im projektierten Projektzeitraum zu erreichen, besonders wenn diese die positiven Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen umfassen [12].

Schlüssige zeitliche Entwurfskonzepte für die Begrünung mit Bäumen in Pflanzgefäßen sind so zu entwickeln, dass die genannten Aspekte berücksichtigt und die beteiligten Akteur:innen (Landschaftsarchitekt:in, Architekt:in, Bauherr:in, Baumschule, Gärtner:in, Pflanzgefäßhersteller:in) mit ihren jeweiligen Aufgaben (Planung, Bau, Vorkultur, Produktion, Pflanzung, Pflege) einbezogen werden. Für die Kommunikation des Konzeptes mit allen Projektbeteiligten haben sich grafische Darstellungen als besonders hilfreich erwiesen, die zeitlichen Abläufen, die im Bezug zur Wachstumsdynamik des Baumes im Pflanzgefäß stehen, umfassen und die geplanten Projektschritte sowie die dazu nötigen Maßnahmen der beteiligten Akteure 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 berücksichtigten 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.

2.2 Fragestellungen und Ziele

Die Ziele des Projekts sind zum einen die Schließung von Wissenslücken in den Bereichen Vegetationstechniken und Wachstumsfaktoren, die Entwicklung von Wachstumsmodellen für Bäume in Pflanzgefäßen und die Erarbeitung einer zeitabhängigen Entwurfstypologie für eine nachhaltige Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen in Freiräumen, die nicht über ausreichend Erdvolumen für einen Baum verfügen. Der Begriff „zeitabhängige Entwurfstypologie“ wurde neu eingeführt, um die im Antrag beschriebene Strategieentwicklung zur Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen in dichten urbanen Situationen als Begrünungsvariante konkreter zu beschreiben. Unter „zeitabhängig“ wird dabei ein Ansatz verstanden, der die gesamte Lebenszeit eines Baumes, von der Vorkultur in

der Baumschule, über die Entwicklung im Pflanzgefäß bis zu einem möglichen Austausch der Pflanze betrachtet.

Das Forschungsvorhaben wird von folgenden Fragestellungen geleitet:

1.) Wachstumsfaktoren

- a. Welche vegetationstechnischen Voraussetzungen müssen erfüllt sein, damit sich Bäume in Pflanzgefäßen langfristig gut entwickeln und die an sie gestellten mikroklimatischen und gestalterischen Anforderungen erfüllen?
- b. Welche Techniken (Art der Pflanzgefäße, Substrate, Bewässerungstechniken) und Baumarten sind unter unterschiedlichen Standortbedingungen geeignet?
- c. Wie wirken sich bestimmte Wachstumsfaktoren z.B. auf das Wachstum und somit auf die klimatische Wirkung und langfristige Vitalität von Bäumen in Pflanzgefäßen aus?
- d. Wie beeinflusst Wurzeldeformation das Wachstum und die Leistungsfähigkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen, betrachtet über einen Zeitraum von mehr als drei Vegetationsperioden?
- e. Wie beeinflussen die verschiedenen Wachstumsbedingungen (Pflanzgefäßtyp, Bewässerung trocken – optimal, Substrattemperatur) die Biomasse und deren Verteilung (Blatt, Ast, Stamm, Wurzeln) sowie die Wurzelarchitektur?

2.) Wachstum und Ökosystemleistung

- a. Wie lassen sich die mikroklimatischen Wirkungen von Bäumen in Pflanzgefäßen erfassen und modellieren?
- b. Welche Unterschiede bezüglich des Wachstums und der Ökosystemleistungen der untersuchten Baumarten ergeben sich in Abhängigkeit der einzelnen Variablen (Art der Pflanzgefäße, Substrate, Bewässerungstechniken)?

3.) Entwurf und Umsetzung

- a. Wie wird mit den Aspekten Zeit und Wachstum von Bäumen in Pflanzgefäßen in realisierten Projekten umgegangen und welche zeitabhängigen Entwurfskonzepte lassen sich daraus ableiten?
- b. Wie können öffentliche Räume und grüne Architekturen auf dieser methodischen und technischen Basis entworfen und umgesetzt werden?
- c. Wie können sie mit anderen Maßnahmen der Klimawandelanpassung (z.B. Regenwassermanagement/ Hochwasserschutz, Grauwassernutzung) synergetisch verknüpft werden, um eine größtmögliche Nachhaltigkeit und Klima-Resilienz für Städte zu erzielen?
- d. Wie hoch ist die Langlebigkeit von Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen? Können Wissenslücken zur Langlebigkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen und Präzisierung der Entwurfsstrategien für Bäume in Pflanzgefäßen anhand einer Dokumentation von Fallbeispielen geschlossen werden?

2.3 Arbeitspakete

Die oben genannten Fragestellungen werden innerhalb von drei Arbeitspaketen beantwortet (Abbildung 1).

Arbeitspaket 1 untersucht die Faktoren, die das Wachstum von Bäumen in Pflanzgefäßen beeinflussen. Hierbei werden Literatur- und Patentrecherchen durch Experteninterviews ergänzt und quantitative modellhafte Abschätzungen basierend auf Messungen anhand eigener Pflanzversuche durchgeführt.

Arbeitspaket 2 befasst sich mit dem Wachstum und den Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen, sowie deren Modellierung als Grundlage für detaillierte Aussagen zum Verhalten von Bäumen in Pflanzgefäßen.

Arbeitspaket 3 erarbeitet durch die Analyse von Projekten und anhand von entwickelten Beispielentwürfen im Rahmen von zwei Entwurfsseminaren mit Studierendeneine zeitabhängige Entwurfstypologie zur Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen. Anhand von Fallbeispielen wird die Lebensdauer von Bäumen analysiert.

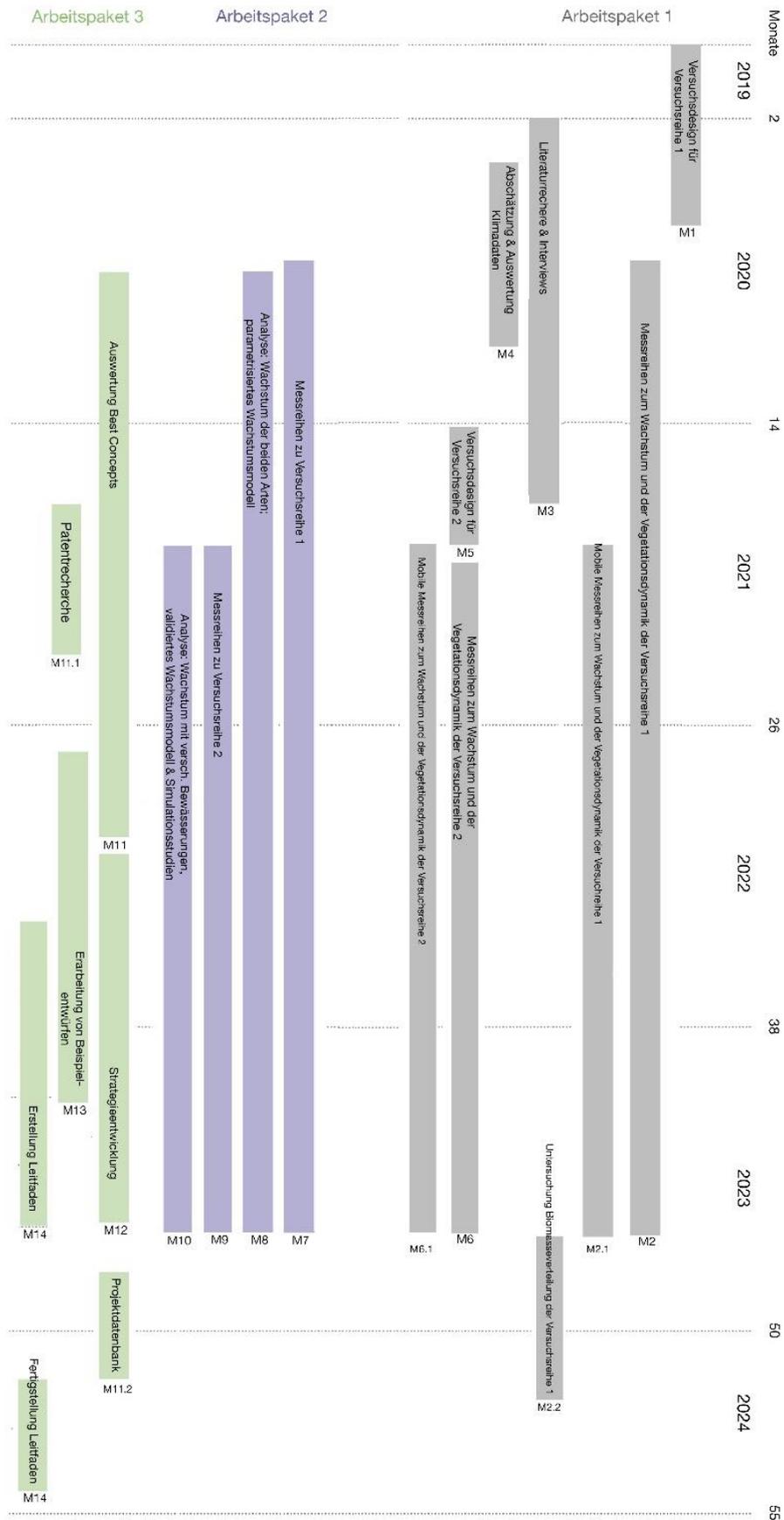


Abbildung 1. Zeitplan des ZSK-Forschungsprojektes mit Meilensteinen einschließlich des Verlängerungszeitraums 01.11.2022 – 31.05.2024.

3. Arbeitspaket 1

3.1 Methodik

3.1.1 Literaturrecherche

Um einschlägige wissenschaftliche Veröffentlichungen über Bäume in Pflanzgefäßen zu ermitteln, wurde die Verwendung von Schlüsselwörtern in Internet-Suchmaschinen wie Google, Google Scholar und einschlägigen Online-Bibliotheksdatenbanken mit der Schneeballmethode kombiniert [21]. Die verwendeten Schlagworte waren: Baum, Pflanzgefäß, Pflanzkübel, Container, Wachstum, Langlebigkeit, Dynamik, Wurzelraum, Volumen, Größe. Die Schlüsselwörter Pflanzgefäß, Pflanztopf und Container werden in der Forschung und Praxis des Gartenbaus, der Baumschulen und der Herstellung von Pflanzgefäßen häufig und synonym verwendet. Die Schlagworte Wachstum, Langlebigkeit, Dynamik, Wurzelraum, Volumen und Größe betonen den Suchfokus auf pflanzenphysiologische Aspekte.

3.1.2 Experteninterviews

Ziel der Experteninterviews war es, praktische Erfahrungen über die Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen zu sammeln, da dieses Wissen nur selten veröffentlicht wird. Die Experteninterviews wurden halbstrukturiert mit der Möglichkeit zur Erweiterung um spontane Themen durchgeführt und orientierten sich methodisch an den Vorgaben von Mieg und Näf [22]. Die Experten wurden aus verschiedenen Disziplinen ausgewählt, die sich mit dem Thema Bäume in Pflanzgefäßen beschäftigen. Es wurden insgesamt 8 Interviews geführt. Darunter waren Gärtner (1), Baumschulen (2), Landschaftsarchitekten (2), Architekten (1) und Pflanzgefäßhersteller (2). Die Erkenntnisse aus den Experteninterviews dienen zusammen mit den Ergebnissen der Literaturrecherche als Grundlagenwissen in der Erstellung der Best-Concept-Fallstudie, der Entwicklung einer zeitabhängigen Entwurfstypologie sowie für den Leitfaden. Den Fragebogen finden Sie in den Anhängen.

3.1.3 Wachstumsversuche Versuchsreihe 1 und 2

Standort und Lageplan Versuchsfläche

Die Versuchsreihen wurden am Gewächshauslaborzentrum Dürnast des Campus Weihenstephan etabliert (UTM Koordinaten: 32 U 699137, 5364711, Abbildung 2). Die Fläche liegt etwa 2 km westlich des Campus Freising-Weihenstephan. Sie wird nicht durch die angrenzende Vegetation verschattet und ist nach Süden ausgerichtet. Auf der Versuchsfläche wurde durch das Gewächshauslaborzentrum Dürnast ein Bodenaustausch vorgenommen. Somit bestehen die oberen 30 cm aus humusreichem Oberboden mit darunter anstehender Braunerde aus Schluff bis tonigem Schluff (Bayerische Vermessungsverwaltung 2020). Zudem sind in einer Tiefe von ca. 60 cm zwei Drainagerohre verlegt. Mit Staunässe ist daher im anstehenden Erdreich nicht zu rechnen.



Abbildung 2. Übersichtskarte der Versuchsfläche im Rahmen des Projektes (rot) in Dürnast, Freising. Luftbild: Bayerische Vermessungsverwaltung, 2020

Abbildung 3 zeigt den Lageplan der Versuchsfläche am Gewächshauslaborzentrum in Dürnast. Versuchsreihe 1 umfasst dabei insgesamt 128 Bäume in 8 Reihen mit jeweils 16 Bäumen. Versuchsreihe 2 umfasst 18 Bäume in einer Reihe.



Abbildung 3. Lageplan der Versuchsreihe 1 + 2

3.1.4 Versuchsdesign Versuchsreihe 1

Pflanzen

Für die Versuchsreihe wurden Anfang März 2020 jeweils 64 *Tilia cordata* und *Platanus x hispanica* gepflanzt. Die Baumartenwahl wurde aufgrund der vorhandenen Expertise bzgl. der vorliegenden Forschungsarbeiten zu mikroklimatischen Einflüssen von Stadtbäumen mit *T. cordata* und *P. hispanica* getroffen. Die Pflanzqualität ist STU 10/12 2xv; es wurde wurzelnackte Pflanzware (Abbildung 4) verwendet (vgl. Wrede 2017). Dies ermöglicht die Verwendung identischer Substrate in allen Pflanzvarianten.



Abbildung 4. Bemusterung wurzelnackter Pflanzware, links: *P. hispanica* STU 10/12 2xv, rechts: *T. cordata* STU 10/12 2xv

Pflanzvarianten

Pro Baumart werden 4 Pflanzvarianten und 2 Bewässerungsvarianten untersucht (s. Abbildung 5 und Abbildung 3). Jede Variante verfügt über 8 Wiederholungen. Die Pflanzvarianten umfassen:

- Bäume in die Erde gepflanzt als Kontrollgruppe
- Bäume im Pflanzgefäß in der Erde zum Vergleich der Auswirkung von begrenztem Wurzelraum bei gleicher Temperatur im Wurzelraum wie die Kontrollgruppe
- Bäume in handelsüblichen Pflanzgefäßen ohne temperaturisolierende Wirkung auf den Wurzelbereich durch das Pflanzgefäß zum Vergleich von begrenztem Wurzelraum und starker äußerlicher Temperatureinwirkung auf die Bäume
- Bäume in Pflanzgefäßen mit temperaturisolierender Wirkung durch das Pflanzgefäß zum Vergleich von begrenztem Wurzelraum und reduzierter äußerlicher Temperatureinwirkung auf die Bäume.

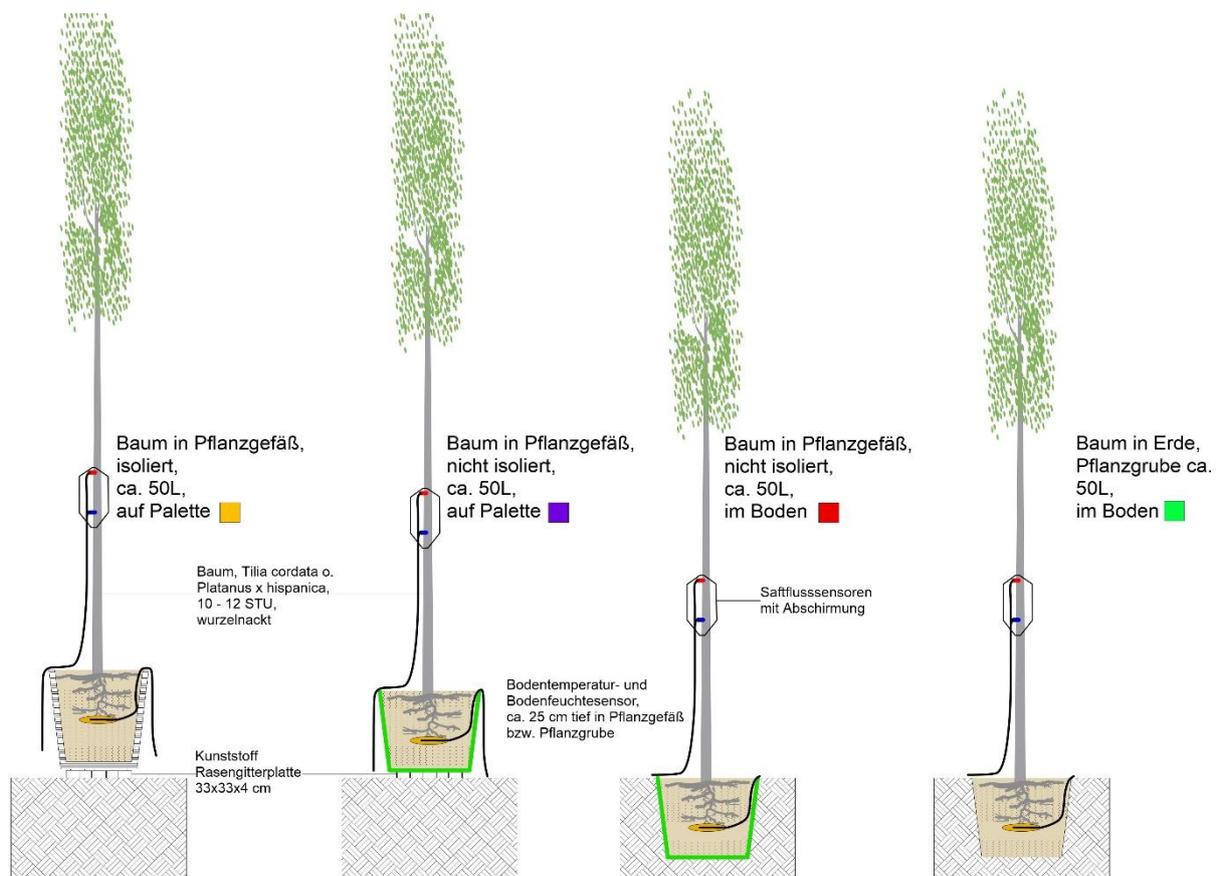


Abbildung 5. Aufbau Pflanzvarianten mit dargestellter Installation der verwendeten Messinstrumente

Pflanzgefäße

Für den Pflanzenversuch wurden schwarze Kunststoffpflanzgefäße (Firma Geli) mit einem Volumen von 50 L sowie schwarze EPP-Pflanzgefäße (Firma Hirsch Porozell) mit einer 3 cm starken Wand aus expandiertem Polypropylen (EPP) mit wärmedämmender Wirkung und einem Volumen von 52 L verwendet. Bei den schwarzen Kunststoffpflanzgefäßen handelt es sich um handelsübliche Ware, die in großer Stückzahl im alltäglichen Gebrauch in Baumschulen verwendet wird. Die EPP-Pflanzgefäße der Firma Hirsch Porozell sind ein neues Produkt, das aufgrund seiner wärmedämmenden Eigenschaft ausgewählt wurde (Abbildung 5). Alle Pflanzgefäße verfügen über die gleiche Anzahl und Größe an Drainagelöchern. Für die Bäume in der Erde wurden Pflanzgruben mit den Maßen entsprechend der Pflanzgefäßabmessungen ausgehoben. Der Aushub der Pflanzgruben wurde mit einem beauftragten Baggerunternehmen durchgeführt. Die 32 Kunststoffpflanzgefäße für die

Verwendung im Boden wurden zur Verhinderung des Auswurzeln in das anstehende Erdreich mit wasserdurchlässigem Wurzelschutzfließ (Rootguard Wurzelschutz 260g/m² von Terragala) eingeschlagen. Die restlichen Pflanzgefäße wurden auf Kunststoffrasengitter mit einer Höhe von 4 cm gestellt. Zusammen mit einem auf dem Boden ausgelegten Bändchengewebe mit 100 g/m² soll so eine Wurzelbildung der Bäume vom Pflanzgefäß in die Erde sowie eine Wärmeübertragung zwischen Pflanzgefäß und Erdreich verhindert werden. Im unmittelbaren Umfeld der Stammbasis ist das Erdreich bzw. Substrat bei allen Varianten mit dem gleichen Bändchengewebe abgedeckt (Unkraut- und Austrocknungsschutz).

Substrat und Düngung

Als Substrat wurde für alle Varianten das Produkt „Urban Soil“ (Firma Optigrün) verwendet. Das Substrat besteht, laut Herstellerangaben, aus Bims, Lava und nach RAL-Güte gesicherter Kompost (Optigrün international AG 2017). Alle Bäume der Versuchsreihe 1 erhielten am 18.03.2020 entsprechend der in der Gehölzproduktion üblichen Praxis eine Depotdüngung von 250 g (5g/L) Osmocote Exact Standard (8-9M) (vgl. Wrede et al. [23]).

Alle Bäume der Versuchsreihe 1 erhielten am 21.04.2021 entsprechend der in der Gehölzproduktion üblichen Praxis eine Depotdüngung von 250 g (5g/L) Osmocote Exact Standard (8-9M).

Im Versuchsjahr 2022 wurde zur Anpassung der Düngermenge die Restdüngermenge durch Probenentnahme von 32 zufällig ausgewählten Bäumen (Versuchsreihe 1 + 2) bestimmt. Es wurde eine durchschnittliche Restdüngermenge von 125g/Baum ermittelt. Daraufhin wurde die Düngergabe für alle Bäume (Versuchsreihe 1 + 2) auf 125g reduziert und am 07.07.2022 appliziert. Somit wurde wieder eine Depotdüngermenge von 250 g (5g/L) Osmocote Exact Standard (8-9M) entsprechend der in der Gehölzproduktion üblichen Praxis erreicht.

Im Versuchsjahr 2023 wurde, wie im Versuchsjahr 2022 die Restdüngermenge bestimmt. Dabei wurde eine durchschnittliche Restdüngermenge von 125g/Baum ermittelt. Mit einer Düngergabe von 125g/Baum wurde am 30.06.2023 die Depotdüngermenge wieder auf die in der Gehölzproduktion üblichen Praxis von 250g/Baum (5g/L) Osmocote Exact Standard (8-9M) aufgefüllt.

Bewässerung

Die Bewässerungsvarianten teilen sich in optimale Bewässerung und Trockenstress auf, dabei wird Niederschlag als natürliche Varianz in der Bewässerung berücksichtigt (s.u.). Als vegetations-technisch wichtigste Faktoren werden kontinuierlich an 32 Bäumen (16 *Tilia cordata*, 16 *Platanus x hispanica*) Bodenfeuchte und Bodentemperatur gemessen.

Die Steuereinheit verfügt über 4 Ventile, die wie folgt zugeordnet sind:

- Bäume im Boden optimal bewässert
- Bäume im Boden mit Trockenstress
- Bäume in Pflanzgefäßen optimal bewässert
- Bäume in Pflanzgefäßen mit Trockenstress

Jeder Baum wird über fünf Chamäleon-Tropfer mit einer Durchflussrate von je 2 L/h bewässert. Zur Überwachung der Bewässerungsanlage wird die eingestellte Wassermenge anhand von 8 Kontrolleimern regelmäßig überprüft. Als optimale Wasserversorgung gilt ein konstanter Bodenfeuchtegehalt zwischen 20% und 30% (Escalona et al. 2002, Aranda et al. 2020). Für Bäume mit Trockenstress liegt die entsprechende Zielgröße der Bodenfeuchte bei ca. 10 - 15%. Zur Bewässerung wird Leitungswasser von einem Hydranten am Versuchsfeld vom Gewächshauslaborzentrum Dürnast verwendet.

Versuchsjahr 2020

Von der Pflanzung (Anfang März) bis Ende Mai wurden die Bäume nach Bedarf von Hand gewässert. Ab dem ersten Juni wurde schrittweise eine automatische Bewässerungsanlage mit Zeitsteuerung in Betrieb genommen. Im Zeitraum zwischen dem 19.06 und dem 26.06 kam es dabei durch einen technischen Defekt zu einer Unterbrechung der Wasserversorgung. Um das Anwachsen aller Bäume sicherzustellen, wurden in der ersten Vegetationsperiode alle Bäume optimal bewässert (keine Bewässerung mit Trockenstress). Nach der Unterbrechung der Wasserversorgung wurden nach augenscheinlicher Überprüfung der Substratfeuchte (übliche gärtnerische Praxis) vier Mal wöchentlich folgende Wassermengen appliziert:

- 26.06. – 19.07.2020: 3,3 L pro Gießgang
- 20.07 – 16.09.2020: 4 L pro Gießgang (Erhöhung der Gießmenge aufgrund erhöhter Lufttemperatur und Zunahme in der Blattmasse)
- 17.09. – 22.09.2020: Erhöhung auf 5 L pro Gießgang aufgrund von anhaltend hoher Temperaturen und damit einhergehend höherem Wasserbedarf
- 23.09.2020 – 31.10.2020: Reduzierung auf 4 L pro Gießgang.

Die Bewässerungsanlage wurde am 01.11.2020 außer Betrieb genommen, um ein Auffrieren der Leitungen zu verhindern.

Versuchsjahr 2021

Nachdem in der ersten Vegetationsperiode (2020) alle Bäume optimal bewässert wurden, um das Anwachsen sicherzustellen, wurde in der zweiten Vegetationsperiode (2021) ab Mitte Juni für die Hälfte der Bäume die Trockenstressbewässerung durchgeführt. Die Gießmengen in der Vegetationsperiode 2021 wurden anhand der Auswertung der Bodenfeuchtedaten angepasst. Die Bäume wurden täglich wie folgt bewässert:

- 19.04. – 09.05.2021: 2 L pro Baum und Tag (alle Bäume)
- 10.05 – 30.05.2021: 3 L pro Baum und Tag (Erhöhung der Gießmenge aufgrund der Zunahme in der Blattmasse) (alle Bäume)
- 31.05. – 17.06.2021: Erhöhung auf 5 L pro Baum und Tag (Erhöhung der Gießmenge aufgrund erhöhter Lufttemperatur und Zunahme in der Blattmasse) (alle Bäume)
- 18.06.2021 – 31.10.2021:
 - o 64 Bäume mit 3 L pro Baum und Tag
 - Bewässerungsziel: Trockenstress; Bodenfeuchte zwischen 10 und 15 % VWC
 - o 64 Bäume mit 7 L pro Baum und Tag
 - Bewässerungsziel: Optimalbewässerung; Bodenfeuchte bei 30% VWC
- 01.11.2021: Außerbetriebnahme der Bewässerungsanlage, um ein Auffrieren der Leitungen zu verhindern. Ende der Vegetationsperiode für sommergrüne Laubbäume.

Im Zeitraum zwischen dem 20.05.2021 und dem 28.05.2021 kam es durch einen technischen Defekt in der Hauptwasserversorgung des Gewächshauslaborzentrums Dürnast zu einer Unterbrechung der Wasserversorgung. Diese hatte aufgrund geringer Blattmasse und ausreichendem Niederschlag keine signifikante Auswirkung auf das Baumwachstum. Im Zeitraum vom 20.06. bis 22.06. gab es eine Leckage an einem Rohrverbinder, die die optimal bewässerten Bäume in Pflanzgefäßen in den Reihen 6, 7 und 8 betraf. Die Leckage beeinflusste die Bäume unterschiedlich stark. So hat eine Platane einen Blattverlust von ca. 90% erlitten, alle anderen Bäume zeigten nur minimalen bis keinen Blattverlust. Der beobachtete Unterschied im Blattverlust kann nicht näher erklärt werden.

Versuchsjahr 2022

In der dritten Vegetationsperiode (2022) wurde für die Hälfte der Bäume die Trockenstressbewässerung durchgeführt. Die Gießmengen in der Vegetationsperiode 2022

wurden anhand der Auswertung der Bodenfeuchtedaten der zweiten Vegetationsperiode (2021) angepasst. Es wurden darauf basierend beschlossen die tägliche Gießmenge auf zwei tägliche Gießgänge zu verteilen, um eine möglichst niedrige Fluktuation in der Bodenfeuchte über den Tag zu erhalten. Ziel dieser Maßnahme ist es, möglichen kurzzeitigen Trockenstress für die Bäume mit Optimalbewässerung an heißen Sommertagen zu reduzieren. Die Bäume wurden täglich wie folgt bewässert:

- 01.11.2021 – 10.04.2022: keine Bewässerung, da keine Vegetationsperiode für sommergrüne Laubbäume
- 11.04. – 28.04.2022: 4 L pro Baum und Tag (alle Bäume)
- 29.04. – 31.10.2022:
 - o 64 Bäume mit 3 L pro Baum und Tag, in zwei Gießgängen 8:00 Uhr und 14:00 Uhr (1,5 L pro Gießgang)
 - Bewässerungsziel: Trockenstress; Bodenfeuchte zwischen 10 und 15 % VWC
 - o 64 Bäume mit 8 L pro Baum und Tag, in zwei Gießgängen 8:00 Uhr und 14:00 Uhr (4 L pro Gießgang)
 - Bewässerungsziel: Optimalbewässerung; Bodenfeuchte bei 30% VWC
- 01.11.2022: Außerbetriebnahme der Bewässerungsanlage, um ein Auffrieren der Leitungen zu verhindern. Ende der Vegetationsperiode für sommergrüne Laubbäume.

Versuchsjahr 2023

In der dritten Vegetationsperiode (2022) wurde für die Hälfte der Bäume die Trockenstressbewässerung durchgeführt. Die Gießmengen in der Vegetationsperiode 2022 wurden anhand der Auswertung der Bodenfeuchtedaten der zweiten Vegetationsperiode (2021) angepasst. Es wurden darauf basierend beschlossen die tägliche Gießmenge auf zwei tägliche Gießgänge zu verteilen, um eine möglichst niedrige Fluktuation in der Bodenfeuchte über den Tag zu erhalten. Ziel dieser Maßnahme ist es, möglichen kurzzeitigen Trockenstress für die Bäume mit Optimalbewässerung an heißen Sommertagen zu reduzieren. Die Bäume wurden täglich wie folgt bewässert:

- 01.11.2022 – 01.05.2023: keine Bewässerung, späterer Start der Bewässerung im Vergleich zu den Vorjahren, da kühle Temperaturen einen späteren Blattaustrieb bedingten und der April sehr niederschlagsreich war und somit ausreichend Wasser für die Bäume verfügbar war.
- 01.5. – 31.10.2023:
 - o 64 Bäume mit 3 L pro Baum und Tag, in zwei Gießgängen 8:00 Uhr und 14:00 Uhr (1,5 L pro Gießgang)
 - Bewässerungsziel: Trockenstress; Bodenfeuchte zwischen 10 und 15 % VWC
 - o 64 Bäume mit 9 L pro Baum und Tag, in zwei Gießgängen 8:00 Uhr und 14:00 Uhr (4,5 L pro Gießgang)
 - Bewässerungsziel: Optimalbewässerung; Bodenfeuchte bei 30% VWC
 - Aufgrund von Baumwachstum musste die Bewässerungsmenge nach oben angepasst werden
- 01.11.2023: Außerbetriebnahme der Bewässerungsanlage, um ein Auffrieren der Leitungen zu verhindern. Ende der Vegetationsperiode für sommergrüne Laubbäume.

Im Zeitraum zwischen dem 03.07.2023 und dem 09.07.2023 gab es eine Leckage an einem Rohrverbinder, die die Bäume in Pflanzgefäßen im Trockenstress in den Reihen 1, 2 und 3 betraf. Die Leckage beeinflusste die Bäume unterschiedlich stark. Bäume im Pflanzgefäß im Boden wiesen tendenziell einen Blattverlust von ca. 50% auf. Bäume in oberirdischen Pflanzgefäßen erlitten einen Blattverlust von 95 – 100%. Der beobachtete Unterschied im Blattverlust ist stark darauf zurückzuführen, dass die Bäume in Pflanzgefäßen im Boden mittlerweile gefunden haben mit ihren Wurzeln das umliegende Erdreich zu erschließen. Im Zeitraum zwischen dem 11.09.2023 und dem 15.09.2023 sowie dem 19.09.2023 und

20.09.2023 wurde im Verteilerkasten zur Stromversorgung des Versuchsfeldes die Sicherung ausgeschaltet, ohne uns über diesen Vorgang zu unterrichten. Dies führte zu einem sehr frühen Blattabwurf aller Bäume in Pflanzgefäßen (Versuchsreihe 1 und 2). Im gleichen Zeitraum konnte ohne die Stromversorgung auch keine Messdaten durch Bodensensoren erhoben werden. Nachdem die Sicherung wieder angeschaltet wurde, funktionierte das Bewässerungssystem wieder vollständig. Um zukünftigen ungewünschten Stromabschaltung im Verteilerkasten zuvorzukommen, wurde eine entsprechende Notiz an der Sicherung angebracht. Seitdem läuft die Bewässerung wieder ohne Unterbrechung.

3.1.5 Versuchsreihe 2

Pflanzen

Für die 2. Versuchsreihe wurden Anfang März 2021 18 Platanen (*P. hispanica*) gepflanzt (Vergleich Versuchsreihe 1, Abbildung 4).

Pflanzvarianten

In der Versuchsreihe 2 werden Platanen in drei Pflanzvarianten untersucht (Abbildung 6). Jede Pflanzvariante verfügt über sechs Wiederholungen. Jeweils ein Baum pro Pflanzvariante ist mit einem Bodenfeuchte- und –temperatursensor ausgestattet (vgl. Versuchsreihe 1)

Die Pflanzvarianten umfassen:

- Bäume in runden handelsüblichen Pflanzgefäßen ohne temperaturisolierende Wirkung durch das Pflanzgefäß (Referenzpflanzung mit begrenztem Wurzelraum und starker äußerlicher Temperatureinwirkung auf die Wurzeln)
- Bäume in runden Pflanzgefäßen mit Unterflurbewässerung und Wasserreservoir ohne temperaturisolierende Wirkung durch das Pflanzgefäß
- Bäume in eckigen Pflanzgefäßen mit Unterflurbewässerung und Wasserreservoir sowie temperaturisolierender Wirkung durch das Pflanzgefäß

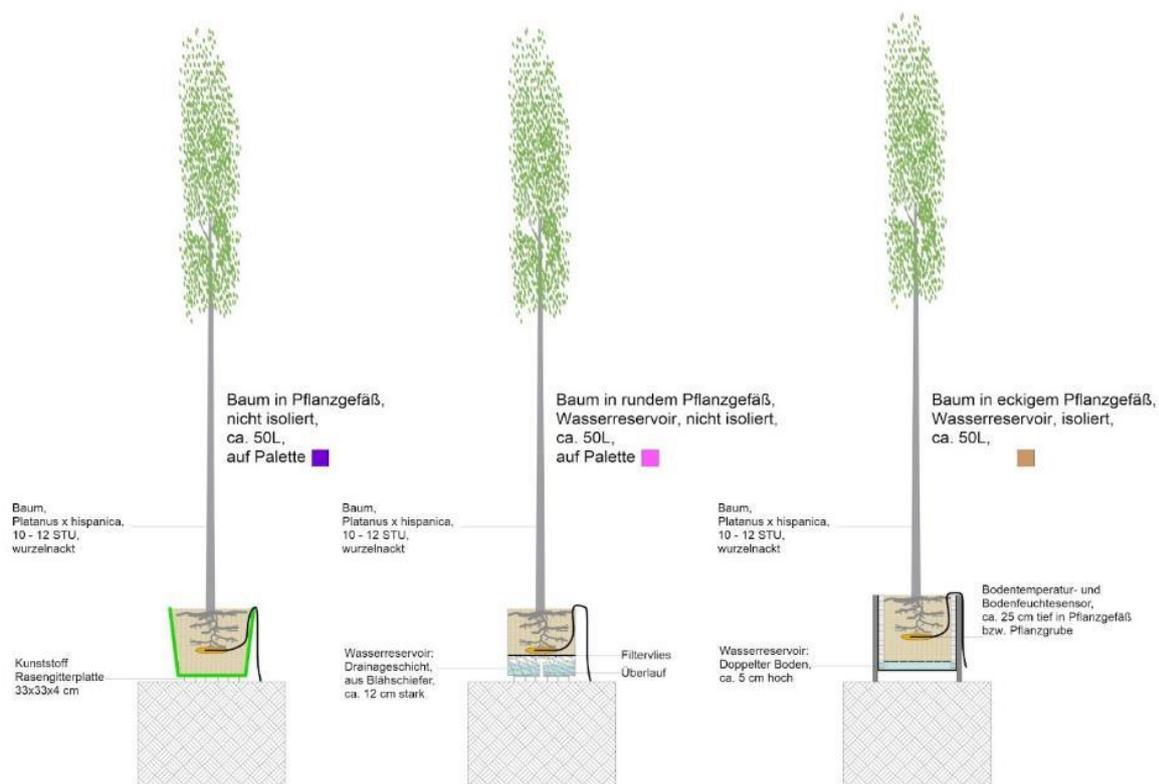


Abbildung 6. Aufbau Pflanzvarianten Versuchsreihe 2 mit Darstellung der Eingebauten Sensoren

Pflanzgefäße

Für den Pflanzenversuch wurden Pflanzgefäße mit einem Volumen von ca. 50 L gewählt (vgl. Versuchsreihe 1, Abbildung 6). Dies sind runde schwarze Kunststoffpflanzgefäße der Firma Geli (vgl. Versuchsreihe 1), runde anthrazitfarbene Aluminiumgefäße der Firma Optigrün und eckige anthrazitfarbene Aluminiumgefäße der Firma Plantener. Bei den schwarzen Kunststoffpflanzgefäßen handelt es sich um handelsübliche Ware, die in großer Stückzahl im alltäglichen Gebrauch in Baumschulen verwendet wird. Die beiden anderen Gefäßtypen werden in der Dach- und Freiraumbegrünung verwendet. Sie verfügen über Wasserreservoirs, die im Falle von Trockenheit als Pufferspeicher dienen. Optigrün verwendet zur Umsetzung des Wasserreservoirs eine Drainageschicht mit Überlauf, die ca. ein Drittel der Pflanzgefäßhöhe stark ist. In dem Volumen von 50 L ist hierbei die Drainageschicht enthalten. Diese besteht aus Blähschiefer und ist durch ein Filtervlies vom Substrat getrennt, wodurch verhindert werden soll, dass die Drainage- und Wasserspeicherefähigkeit durch Feinstoffeintrag beeinträchtigt wird. Die Bäume können laut Herstellerangaben durch das Vlies in die Drainageschicht wurzeln. Plantener arbeitet mit einem Kunststoffeinsatz mit doppeltem Boden, um das Wasserreservoir herzustellen. Laut Herstellerangaben kann bzw. soll der Baum nicht in das Wasserreservoir wurzeln. Über ca. 3 cm dicke Kapillarmatten an der Pflanzgefäßwand wird das Wasser in den Substratbereich transportiert. Die Kapillarmatten bestehen aus Steinwolle und verfügen somit laut Herstellerangabe auch über eine gewisse wärmedämmende Wirkung. Die Kunststoffpflanzgefäße (Geli) wurden auf Kunststoffrasengitter mit einer Höhe von 4 cm gestellt. Zusammen mit einem auf dem Boden ausgelegten Bändchengewebe mit 100 g/m² soll so eine Wurzelbildung der Bäume vom Pflanzgefäß in die Erde verhindert werden. Die Bäume können bei den Pflanzgefäßen von Optigrün und Plantener nicht aus dem Pflanzgefäß herauswurzeln, da keine konventionellen Drainagelöcher am Gefäßboden vorhanden sind. Die Kunststoffrasengitter dienen ebenfalls zur Unterbindung einer Wärmeübertragung zwischen Pflanzgefäß und Erdreich. Die Pflanzgefäße von Optigrün wurden hierfür jeweils auf zwei Unterleghölzer gestellt, die gleichzeitig einen freien Abfluss des Überlaufs sicherstellen. Die Pflanzgefäße von Plantener verfügen über Standfüße und benötigen somit keine Unterlage. Im unmittelbaren Umfeld der Stammbasis ist das Substrat bei allen Varianten mit dem gleichen Bändchengewebe abgedeckt (Unkraut- und Austrocknungsschutz).

Substrat und Düngung

Als Substrat wurde für alle Varianten wie in Versuchsreihe 1 das Produkt „Urban Soil“ (Firma Optigrün) verwendet. Das Substrat besteht, laut Herstellerangaben, aus Bims, Lava und nach RAL Güte gesicherter Kompost (Optigrün international AG 2017).

Alle Bäume der Versuchsreihe 2 erhielten am 21.04.2021 entsprechend der in der Gehölzproduktion üblichen Praxis eine Depotdüngung von 250 g (5g/L) Osmocote Exact Standard (8-9M) (vgl. Wrede et al. [23]).

Für die Versuchsjahre 2022 und 2023 wurden in der Versuchsreihe 2 die gleichen Düngermengen an den gleichen Tagen appliziert, wie in Versuchsreihe 1 beschrieben.

Bewässerung

Die Versuchsreihe 2 wurde in den Vegetationsperioden 2021, 2022 und 2023 optimal bewässert mit den gleichen Gießmengen wie die Optimalbewässerung der Versuchsreihe 1. Dazu wurde ein weiteres Ventil an die Steuerungseinheit der Versuchsreihe 1 angeschlossen. Jeder Baum wird über fünf Chamäleon-Tropfer mit einer Durchflussrate von je 2 L/h bewässert.

Ziel des Bewässerungskonzepts ist es, den Unterschied in der Wasserversorgung in Trockenperioden und daraus resultierende Einflüsse auf das Baumwachstum und die Ökosystemleistung zwischen Pflanzgefäßen mit und ohne Wasserreservoir zu untersuchen.

3.1.5 Witterungsverlauf auf der Versuchsfläche

Die verwendeten täglichen Mittelwerte der Lufttemperatur, des Niederschlags, sowie der Bodentemperatur in 20 cm Tiefe über den Zeitraum 2020 bis 2023 stammen von der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes in Weihenstephan-Dürnast, die nur ca. 500 m entfernt liegt (DWD 2404).

3.1.6 Wachstumsfaktoren Substrattemperatur und Substratfeuchte

Die Substrattemperatur wurde mit einer Genauigkeit von $\pm 0,8$ °C und die Substratfeuchte mit einer Genauigkeit von $\pm 3\%$ des volumetrischen Wassergehalts im Substrat (VWC) in einer Tiefe von 25 cm unter der Bodenoberfläche (Abbildung 7) mit dem SMT50 (Neustadt, Deutschland) gemessen. Bei dem Sensor SMT50 handelt es sich um einen kombinierten Sensor der gleichzeitig Substrattemperatur und -feuchte misst. In Versuchsreihe 1 wurden insgesamt 32 Sensoren, zwei je Pflanz- und Bewässerungsvariante (insgesamt acht Varianten) für *T. cordata* und ebenso für *P. hispanica* installiert. In Versuchsreihe 2 wurden drei Sensoren je einer pro Pflanzgefäßvariante installiert. Alle Sensoren wurden an einen zentralen Datenlogger (Campelsci 300 Series) im Inneren eines Schutzkastens auf der Versuchsfläche angeschlossen. Der Datenlogger registriert alle 10 Minuten einen Datenpunkt für die Messung der Substrattemperatur. Der Datenlogger wurde regelmäßig ausgelesen. Anschließend wurden die Rohdaten in Excel und R aufbereitet und ausgewertet.



Abbildung 7. Positionierung der Bodenfeuchtesensoren unterhalb des Wurzelstocks vor der Baumpflanzung im Frühjahr 2020. Seit Juni 2020 wurden durch Datenlogger Durchschnittswerte in 10-Minuten-Intervallen erfasst.

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Literaturrecherche

Wasser, Nährstoffe, Substrat und Wurzelraum

Wasser ist der wichtigste Wachstumsfaktor für Bäume, und ohne Wasser kann ein Baum nicht überleben [15,21]. Eine Unterversorgung mit Nährstoffen, ein Mangel an Wurzelraum, suboptimale Substrattemperaturen oder unzureichende Sonneneinstrahlung beeinträchtigen das Wachstum und die Ausbreitung von Bäumen. Daher muss die Wasserversorgung der Bäume vor allem in städtischen Gebieten sichergestellt werden. Begrenzter oder gar unzureichender Wurzelraum schränkt die Wasserverfügbarkeit für Bäume stark ein und erhöht damit die Wahrscheinlichkeit von Trockenstress [11]. 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 [24–26]. Dies verdeutlicht, dass das Bewässerungsregime einen großen Einfluss auf das Wachstum und die Vitalität der Bäume hat [25–31]. Bei Bäumen in Pflanzgefäßen spielt die Bewässerung eine zentrale Rolle, da aufgrund des geringen Substratvolumens die Risiken von Trockenstress und Staunässe als viel höher einzuschätzen sind [11,18,25,32]. Die Wasserversorgung beeinflusst auch die Evapotranspirationskapazität der Bäume. Wenn mehr Wasser aufgenommen werden kann, kann auch mehr Wasser verdunstet werden [11,33,34]. Der städtische Wärmeinseleffekt fördert die Verdunstung der Bäume durch erhöhte Temperaturen [11,18,30,35,36] sowie den täglichen Wasserverbrauch des Baumes. Der tägliche Wasserverbrauch sollte durch Niederschläge, Bewässerung oder eine adäquate Wurzelzone mit ausreichender Wasserspeicherkapazität kompensiert werden, sonst leidet der Baum unter Trockenstress [37]. Trockenstress führt zu vermindertem Wachstum und verringert die Überlebenschancen des Baumes [14,15,37–40]. Ein einziges trockenes Jahr reicht aus, um das Wachstum für mehrere Folgejahre zu beeinflussen [14,39].

Die Düngung kann sich positiv auf das Wachstum und die Vitalität der Bäume auswirken [41]. Düngung oder Überdüngung reduziert das Wurzelwachstum und die Wurzelverzweigung [42,43], 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 [44].

Die Wahl des Substrats ist für das Wachstum und die Vitalität der Bäume besonders wichtig, da in ihm Wurzeln wachsen, die für die Wasser- und Nährstoffaufnahme unerlässlich sind. 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 ist [15,43,45,46]. Dies beeinträchtigt das Wachstum und die Langlebigkeit eines Baumes [40]. Daher sollten Baumsubstrate strukturstabil sein und möglichst viele luftführende Poren aufweisen, da die Versorgung mit Sauerstoff, Wasser und Nährstoffen für den Baum in groben Poren am besten ist [24,40,45]. Entsprechend sollten Baumsubstrate eine ausgewogene Mischung aus groben und feinen Partikeln aufweisen [47]. Das Substrat sollte eine gute Drainagekapazität haben, denn wie bereits erwähnt, kann Staunässe aufgrund von Sauerstoffmangel zu Wurzelfäule führen [24,40,45]. Dennoch sollte das Substrat auch eine gute Wasserspeicherkapazität aufweisen, damit ausreichende Wassermengen gespeichert und dem Baum zur Verfügung gestellt werden können [11].

Gesunde und funktionierende Wurzelsysteme sind für das Überleben und die Leistungsfähigkeit von Bäumen unerlässlich [26,48], da sie dem Baum als Verankerung im Boden und als Wasser- und Nährstofflieferanten dienen [26]. Wurzeln wachsen bevorzugt dort, wo sie ausreichend Wasser und Nährstoffe finden [43,49]. Bäume passen ihr

Wurzelwachstum an die Bodenbedingungen an, wie z. B. flache Wurzelsysteme in verdichteten tiefen Bodenschichten oder an feuchten Standorten oder tiefe Wurzelsysteme in lockerem Boden oder an trockenen Standorten [24,40,42,47,50]. Deformierte Wurzeln (Ringwurzeln, Knickwurzeln), insbesondere bei Setzlingen, können in ihrer Nährstoffaufnahme beeinträchtigt sein und somit trotz ausreichender Nährstoffverfügbarkeit nicht genügend aufnehmen [51,52], was die Vitalität des Baumes verringert [28,29,53,54]. Eine gesunde Wurzelarchitektur ist für die Vitalität eines Baumes wichtiger als die Wurzelmasse, da sich diese besonders auf das Wachstum nach der Baumverpflanzung auswirkt [48,53,55,56]. Im Falle einer Baumverpflanzung sollte ein Wurzelverjüngungsschnitt durchgeführt werden, um das neue Wurzelwachstum zu stimulieren [44,48,57–60]. Das Umtopfen entweder in einen größeren Topf oder in offene Erde wirkt sich positiv auf das Wurzelwachstum und die Wuchsstärke aus [28]. Der Verlust an Wurzelmasse sollte durch einen Kronenschnitt kompensiert werden, um das Gleichgewicht zwischen Wasseraufnahme und Verdunstung wiederherzustellen [24]. Lindsey und Bassuk [11] geben als Empfehlung für die Berechnung des für die Wasserversorgung benötigten Wurzelraums etwa 0,63 m³ Wurzelvolumen pro 1 m² Kronenprojektionsfläche an. Mit künstlicher Bewässerung kann der benötigte Wurzelraum für einen vitalen Baum auf 0,09 - 0,15 m³ Wurzelvolumen pro m² Kronenansatzfläche reduziert werden [27]. Dementsprechend muss der Nährstoffmangel durch Düngung kompensiert werden. 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 [32,44,61–63]. Wenn das Volumen für die Baumgröße ausreichend bemessen ist, führt ein größeres Volumen nicht zu einem größeren Wachstum [19,30,64].

Die Wasseraufnahme hängt von der Bildung neuer Wurzeln ab, da nur durch das Wurzelwachstum neue Feinwurzeln entstehen, die für die Wasseraufnahme verantwortlich sind [24]. Theoretisch bedeutet dies, dass der Baum absterben wird, wenn kein Platz mehr für die Bildung neuer Wurzeln im Pflanzgefäß 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 [53]. Das bedeutet, dass bei künstlicher Bewässerung und Düngung in Kombination mit einem geeigneten Substrat der begrenzte Wurzelraum in einem Pflanzgefäß vom Baum voll genutzt und bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden kann, der Baum aber nicht zu seiner natürlich möglichen Größe heranwachsen kann, wenn der benötigte Wurzelraum deutlich höher ist als der im Pflanzgefäß zur Verfügung gestellte Wurzelraum.

Temperatur in der Wurzelzone

Die Temperatur in der Wurzelzone hat einen großen Einfluss auf das Wurzelwachstum [65–67]. Sowohl Frost als auch Hitze in der Wurzelzone können die Wurzeln schädigen oder sogar zum Absterben der Wurzeln führen [40,68–73]. Bäume in Pflanzgefäßen sind aufgrund der direkten Sonneneinstrahlung auf die Gefäßwand [32,40,55] und des geringen Substratvolumens [25] besonders von hohen Wurzelzonentemperaturen betroffen. Der hohe Versiegelungsgrad in städtischen Gebieten kann den Temperaturstress erhöhen [46,74–76]. Die chronische Exposition der Wurzelzone gegenüber hohen Wurzelzonentemperaturen kann die Lebensdauer eines Baumes aufgrund von Wurzelschäden verkürzen [69,76]. Zu den Ursachen gehören Sauerstoffmangel aufgrund erhöhter Wurzelatmung [24,40,69,77], permanenter Trockenstress durch übermäßige Evapotranspiration trotz ausreichender Bewässerung [69], verringerte Nährstoffaufnahme [33,46,69,77] und Feinwurzelssterben [40,69–73]. In den Sommermonaten kann die direkte Sonneneinstrahlung die Temperatur der Wurzelzone in Pflanzgefäßen leicht auf über 40 °C ansteigen lassen [69,78,79]. Wirksame Mittel zur Senkung der Temperatur im Wurzelbereich sind ein heller Anstrich des Pflanzgefäßes [33,69,80,81], die Verwendung einer wärmedämmenden Pflanzgefäßwand [82]

oder die Beschattung des Pflanzgefäßes [69,77]. Dies kann auch durch den Baum selbst erreicht werden, wenn er eine geeignete Größe hat [77]. Die optimale Temperatur in der Wurzelzone liegt Berichten zufolge je nach Art zwischen 15 und 32 °C [33,40,46,66,70–72,83]. Der Temperaturbereich zwischen 30 und 40 °C gilt als wachstumsmindernd [33,40,46,69,70,76,78,81,84]. Substrattemperaturen über 40 °C sollten vermieden werden, da dieser Temperaturbereich zu Feinwurzelsterben führen kann [40,69–73]. Das Wurzelwachstum beginnt zwischen 2 °C und 11 °C, je nach Art [25,40,42,83]. Bei Frost sterben Feinwurzeln unterhalb von -5 °C ab [68], aber dieser Grenzwert steigt in Früh- und Spätfrostperioden deutlich an [24,68,85].

Der Einfluss der Temperatur in der Wurzelzone wirkt sich auf die Gestaltung der Pflanzgefäße und die Positionierung des Baumes im Gefäß aus, wenn er umgesiedelt wird. Die Ausrichtung von Baum und Pflanzgefäß sollte bei einem Standortwechsel gleichbleiben, da sich die Wurzelstruktur an die unterschiedlichen Temperaturzonen im Pflanzgefäß anpasst, die durch die direkte Sonneneinstrahlung auf die Pflanzgefäßwand entstehen. Der gleiche Effekt gilt für die Kronenstruktur.

Pflanzgefäß

Es wurde intensiv erforscht, wie sich Wurzelverformungen auf das Wachstum von Bäumen nach dem Umtopfen auswirken [58,59,61,63] und welchen Einfluss verschiedene Formen und Texturen von Pflanzgefäßen auf das Wurzelwachstum haben [13,23,28,29,48,60,86], da Wurzelverformungen zu langfristigen Beeinträchtigungen des Wachstums und der Vitalität eines Baumes führen können [13,29]. So ist bekannt, dass sich eine luft- und wasserdurchlässige sowie gerippte oder gebogene Pflanzgefäßwand aufgrund der fehlenden oder geringen Ringwurzelbildung positiv auf die Vitalität eines Baumes in einem Pflanzgefäß auswirkt [23,28,58–60,87]. Poröse Pflanzgefäßwände fördern auch die Belüftung des Substrats und verbessern die Sauerstoffversorgung der Wurzeln [87]. Die Beschichtung der Pflanzgefäßwand mit Kupfer kann ebenfalls zur Verringerung von Ringwurzeln beitragen, wird aber tendenziell nicht so hoch bewertet wie poröse und gerippte Wände [29,48,57,88,89]. Eckige Pflanzgefäße verringern ebenfalls die Bildung von Ringwurzeln [28]. In Pflanzgefäßen mit glatten, geschlossenen Wänden wachsen nur 20 - 25 % der Wurzelmasse in den inneren 50 % des Gefäßes, während 50 % der Wurzelmasse in den äußeren 20 %, am Rand der Gefäßwand, wachsen [32]. Der Einfluss von Umweltfaktoren, wie z. B. Temperaturschwankungen, ist an der Peripherie der Pflanzgefäßwand am stärksten. Dies führt zu schlechten Bedingungen für das Wurzelwachstum, was nicht nur auf das kreisförmige Wurzelwachstum zurückzuführen ist [32]. Es ist zu beachten, dass Pflanzgefäße, die Wurzelverformungen reduzieren, nicht unbedingt einen positiven Effekt auf das Wachstum haben [28]. Sie fördern jedoch eine gleichmäßige Wurzelarchitektur mit einem hohen Anteil an Feinwurzeln und tragen damit im Vergleich zu einem glattwandigen Pflanzgefäß zur Erhöhung der Vitalität des Baumes bei [28]. Breite und flache Pflanzgefäßformen wirken sich tendenziell positiv auf Wachstum und Wuchsstärke sowie auf die Wurzelarchitektur aus [29,60,61,64], da die Wurzelverformung in größerer Entfernung vom Stamm erfolgt, wodurch die Gefahr der Strangulation minimiert wird [60]. Gute Verhältnisse zwischen Breite und Höhe sind 1:1, 3:1 und 6:1 [64]. 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 [25]. Laut zwei Experteninterviews (Belz, Martin, pers. Mitt., 21. Januar 2021; Dierksen, Christoph und Wolber, Peter, pers. Mitt.) sind gute Verhältnisse von Baum- und Pflanzgefäßgrößen zum Zeitpunkt der Pflanzung: Baumgröße von 10 - 12 cm Stammumfang (STC) und Pflanzgefäßvolumen von 2 m³, oder eine Baumgröße von 16 - 18 cm STC und Pflanzgefäßvolumen von 4 m³.

Die Pflanzgefäße müssen strukturell stark genug sein, um den Auswirkungen des Transports von einem Standort zum anderen standzuhalten. Daher sind die Vorteile poröser Pflanzgefäßwände im öffentlichen Raum nur schwer zu realisieren. Pflanzgefäß-im-Pflanzgefäß-Systeme, d. h. ein Pflanzgefäß mit porösen Wänden innerhalb eines strukturell stabilen Pflanzgefäßes, könnten hier eine Lösung sein und zusätzlich die Verpflanzung erleichtern.

3.2.2 Experteninterviews

Tabelle 1. Übersicht der angefragten und geführten Experteninterviews

Experte	Branche	Angefragt	Geführt	Transkribiert
Tobias Kramer	Landschaftsarchitektur	JA	JA	JA
Mathieu Chatenet	Architektur	JA	JA	JA
Christoph Kluska	Baumschule	JA	JA	JA
Jens Hartwich	Baumschule	JA	JA	JA
Christoph Dirksen	Baumschule	JA	JA	JA
Peter Wolber	Baumschule	JA	JA	JA
Plantener	Pflanzgefäße	JA	Absage	-
GKR	Pflanzgefäße	JA	Absage	-
Gartenmetall	Pflanzgefäße	JA	Absage	-
StreetLife	Pflanzgefäße	JA	Absage	-
Urs Wiesendanger	Pflanzgefäße	JA	JA	JA
Oliver Böse	Pflanzgefäße / Substrat	JA	JA	JA
Martin Belz	GaLa-Bau	JA	JA	JA
Joachim Kräftner	Landschaftsarchitektur	JA	JA	JA

Die geführten Experteninterviews (Tabelle 1) ermöglichten die Lücke zwischen Praxis und Theorie zu schließen und besonders zu den Aspekten Baumartenauswahl und Wachstumsdynamik sowie Pflege und Langlebigkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen wichtige Erkenntnisse zu liefern. Daher stellen wir im Ergebnisteil der Experteninterviews die erarbeiteten Erkenntnisse zu diesen Aspekten vor, wobei zu beachten ist, dass es sich hierbei um eine Mischung von Erkenntnissen aus Literaturrecherche und Experteninterviews handelt. Die jeweilige Quelle ist eindeutig angegeben und ermöglicht somit die Schlüsselerkenntnisse aus den Experteninterviews zu identifizieren.

Baumartenauswahl und Wachstumsdynamik

Die Auswahl von Bäumen für städtische Standorte ist aufgrund der komplexen Standortbedingungen schwierig, und die Vorhersage ihrer Ökosystemleistung ist dementsprechend schwierig [90]. Stadtbäume für die klimatischen Verhältnisse in Deutschland sollten mit einem maximalen Niederschlag von 500 mm/Jahr auskommen und eine Frosthärte von mindestens -17,8 bis -23,3 °C aufweisen [91]. Vogt et al. [10] heben Umweltfaktoren hervor, die Stadtbäume tolerieren müssen. Dazu gehören der begrenzte ober- und unterirdische Raum, die städtischen Strahlungsbedingungen (Sonneneinstrahlung, Reflexion und Wärmestrahlung), der städtische Wärmeinseleffekt (UHI), verdichtete Böden, Trockenstress und Luftschadstoffe. Neben den verschiedenen Standortfaktoren ist die Pflanzqualität eine wichtige Voraussetzung für das erfolgreiche Wachstum neu gepflanzter

Bäume. Artenvielfalt ist bei der Baumauswahl von Vorteil, da sie im städtischen Ökosystem eine größere Toleranz gegenüber artspezifischen Krankheiten und Schädlingen [9,10] und eine höhere Ökosystemleistung bietet, da so artspezifische Präferenzen genutzt werden können [5,9,10,92–95]. Die Auswahl kleinwüchsiger Baumarten kann für die Vitalität und Langlebigkeit der Bäume in Pflanzgefäßen von Vorteil sein, da die natürlich mögliche Größe der Baumart und damit der Bedarf an Wurzelvolumen die Grenzen des Pflanzgefäßes nicht überschreitet. Bäume, die dicht gepackt gut wachsen, können auch in kleineren Pflanzgefäßen gut gedeihen [96]. Baumarten, die sich gut an einen regelmäßigen Kronenschnitt anpassen können, bleiben eher vital und erreichen eine lange Lebensdauer in Pflanzgefäßen [97]. Schnell wachsende Baumarten stoßen schneller an die Grenzen eines Pflanzgefäßes als langsam wachsende Baumarten, was zu Stress und möglicherweise zu einer kürzeren Lebensdauer führt [82,98].

Baumarten, die für die Verwendung in Pflanzgefäßen geeignet sind, sollten entweder klein und langsam wachsend sein, einen regelmäßigen Kronenschnitt gut vertragen oder tolerant gegenüber Trockenheit sein. Die gewünschte Baumart sollte alle vier dieser Eigenschaften in sich vereinen.

Pflege und Langlebigkeit

Der begrenzte Platz in Pflanzgefäßen zwingt die Bäume zu einem eingeschränkten Wachstum. Städtische Umweltfaktoren in Form von Hitze, Trockenheit, Nährstoffverfügbarkeit, Luftschadstoffen, Pflege und Vandalismus, deren Einfluss je nach Art der angrenzenden Bebauung stark variieren kann [10,11,99], verschärfen die Auswirkungen des begrenzten Baumwachstums zusätzlich [10,13,15,93]. Bei chronischem Stress beeinträchtigen Umweltfaktoren auch die Vitalität der Bäume und verringern ihre Lebenserwartung [14,15,93]. Erhaltungsmaßnahmen zur Sicherung der Vitalität und damit zur Verlängerung der Lebenserwartung von Bäumen nehmen einen hohen Stellenwert ein [15,100], insbesondere bei Bäumen in Pflanzgefäßen. Der begrenzte Wurzelraum in Pflanzgefäßen stellt den Baum vor extreme Standortbedingungen und reduziert damit die Reaktionszeit auf Trockenstress oder andere Stressfaktoren [32]. 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 Pflegekontrolle sollten Wasser, Nährstoffe, Anzeichen von Krankheiten und Schädlingen, Anzeichen von Vandalismus an Baum und Pflanzgefäß sowie die Unversehrtheit des Pflanzgefäßes überprüft werden.

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. Wenn der Baum im Pflanzgefäß nur ein vorübergehender Eingriff ist 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 umfangreichen praktischen Erfahrungen von Experten. 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 [97]. Die Haltbarkeit des Pflanzgefäßes kommt ins Spiel, wenn die Lebensdauer des Baumes im Pflanzgefäß 20 - 30 Jahre überschreitet. So wird die durchschnittliche Lebenserwartung eines Stadtbaums mit 20 - 40 Jahren angegeben [13,101], manchmal sogar noch niedriger [17].

Bei der Konzeption und Gestaltung von Projekten, bei denen Bäume in Pflanzgefäßen verwendet werden, muss berücksichtigt werden, dass das System eines Baumes in einem Pflanzgefäß immer von endlicher Natur ist.

3.2.3 Witterungsverlauf auf der Versuchsfläche

Versuchsjahr 2020

Das Jahr 2020 war besonders im Frühjahr von Anfang April bis Mitte Mai von einer sehr langen Trockenperiode geprägt (Abbildung 8). Weitere kürzere Trockenperioden während der Sommermonate waren prägend für den Witterungsverlauf für das Versuchsjahr 2022. Der Niederschlag lag somit deutlich unter dem langjährigen Mittel für Freising. Trotz der häufigen Trockenperioden wurden nur wenige Hitzetage registriert.

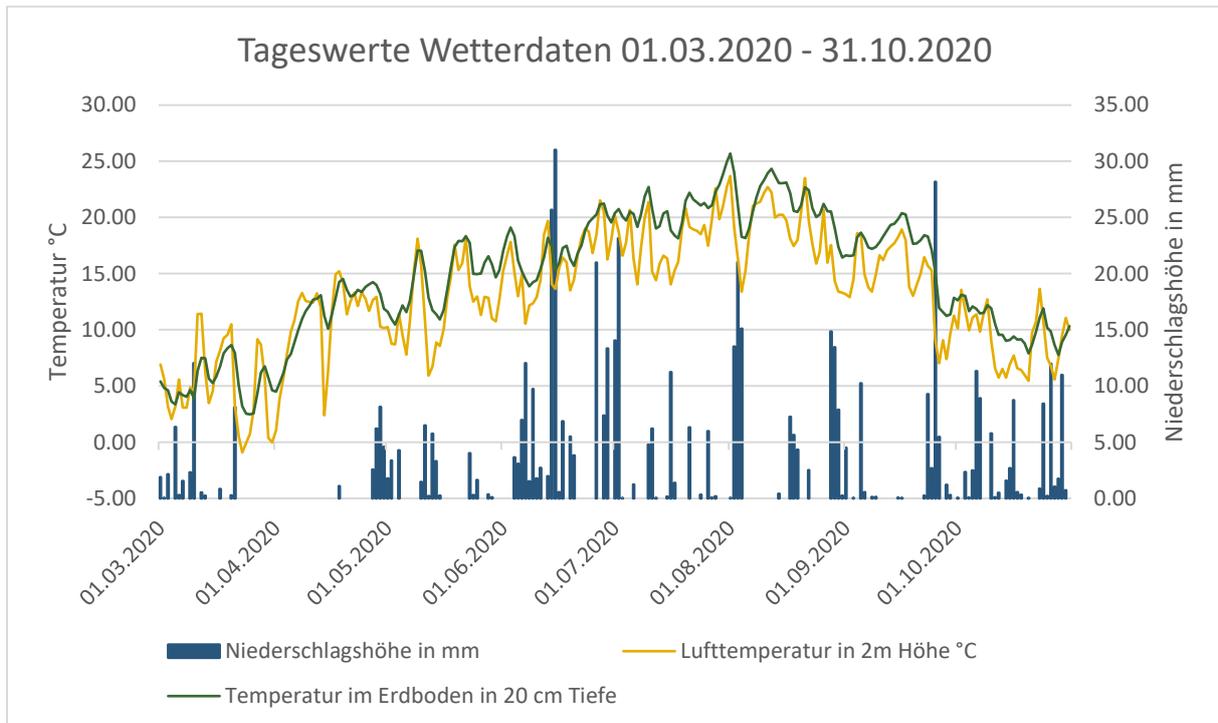


Abbildung 8. Witterungsverlauf auf der Versuchsfläche in Dürnst. Tageswerte vom 01.03.2020 bis 31.10.2020 mit Summen der Niederschläge (blau), mittlere Lufttemperatur (schwarz) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Quelle: Agrarmeteorologie Bayern, 2020

Versuchsjahr 2021

Im zweiten Versuchsjahr gab es im Winter einige Frosttage mit bis zu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abbildung 9). Im Sommer gab es einige Tage mit bis zu $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ und teilweise darüber. Die Bodentemperatur sank in der Frostzeit gegen $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und stieg im Sommer auf bis zu $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Niederschlag lag für das zweite Versuchsjahr mit 780 mm im Bereich des langjährigen Mittels von Freising. Es gab daher nur wenige Trockenstressperioden mit hoher Lufttemperatur und starker Sonneneinstrahlung.

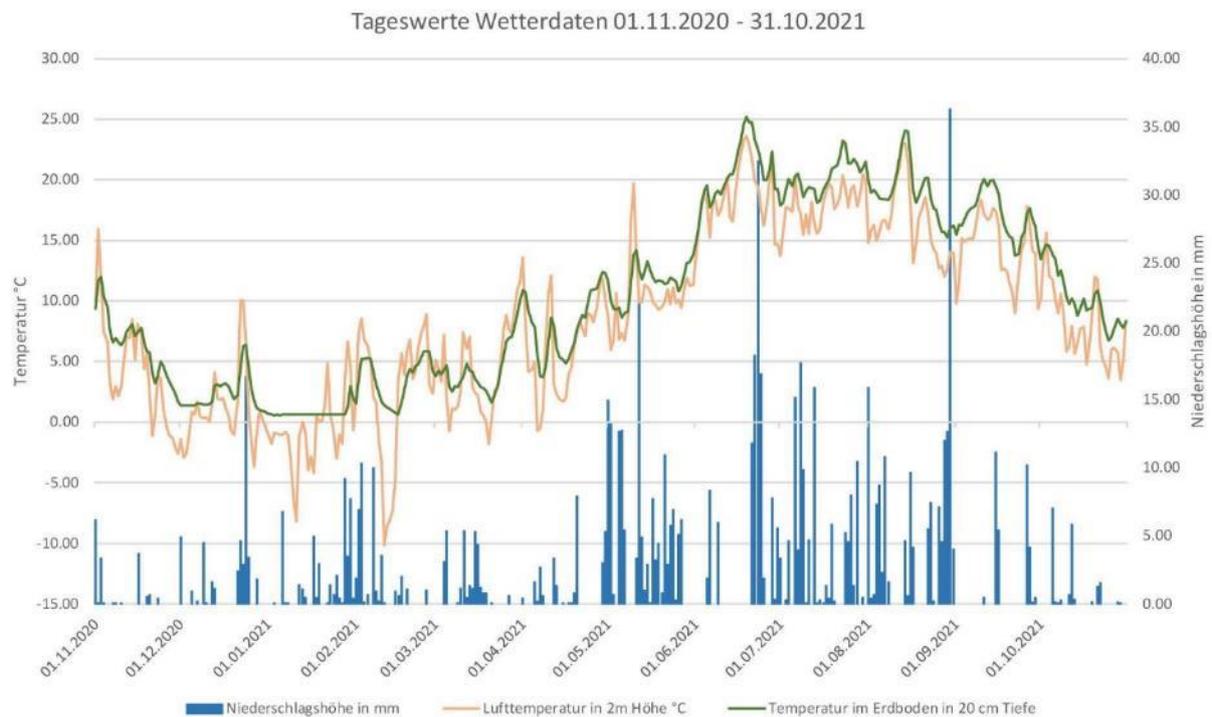


Abbildung 9. Witterungsverlauf für den Standort Dürnast. Tagesmittelwerte vom 01.11.2020 bis 31.10.2021 mit Niederschlägen (blau), mittlere Lufttemperatur (orange) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Datenquelle: DWD, 2021

Versuchsjahr 2022

Die Werte der Lufttemperatur zeigen, dass es im dritten Versuchsjahr im Winter wärmer als im zweiten Versuchsjahr war (Abbildung 10). So gab es nur wenige Frosttage mit bis zu $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ gab. Im Sommer gab es einige Tage mit bis zu $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der Spitze und teilweise darüber. Die Bodentemperatur sank in der Frostzeit nur kurzfristig gegen $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und stieg im Sommer auf über $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es gab eine ausgeprägte Trockenphase von zwei Wochen Mitte Juli 2022 mit konstanten Spitzentemperaturen über $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Niederschlag lag für das dritte Versuchsjahr mit 770 mm im Bereich des langjährigen Mittels von Freising. Es gab eine ausgeprägte Hitze- und Trockenperiode vom 12.07. bis 20.07.2022 mit starker Sonneneinstrahlung.

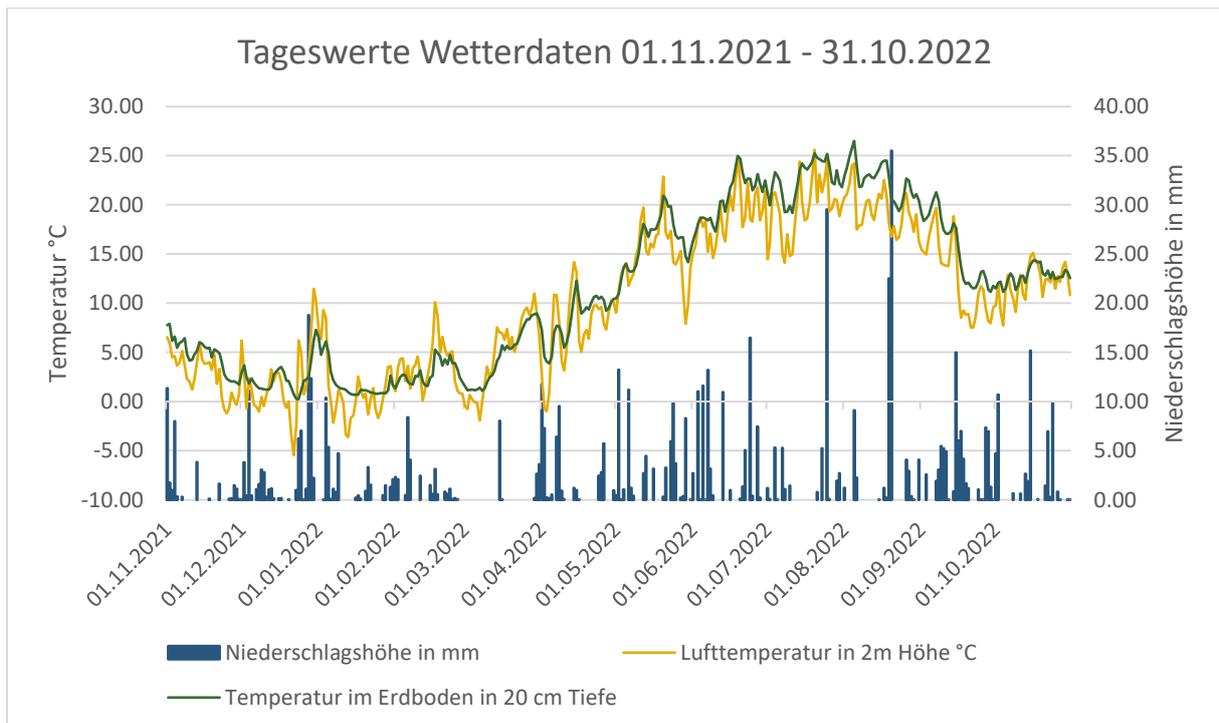


Abbildung 10. Witterungsverlauf für den Standort Dürnast. Tagesmittelwerte vom 01.11.2021 bis 31.10.2022 mit Niederschlägen (blau), mittlere Lufttemperatur (orange) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Datenquelle: DWD, 2022

Versuchsjahr 2023

Im vierten Versuchsjahr gab es im Winter einige kurze Kälteperioden mit bis $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Abbildung 11). Im Sommer gab es einige Tage mit bis zu $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der Spitze und teilweise darüber. Die Bodentemperatur sank in der Frostzeit nur kurzfristig gegen $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und stieg im Sommer auf über $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Niederschlag lag für das vierte Versuchsjahr mit 760 mm im Bereich des langjährigen Mittels von Freising. Es gab eine ausgeprägte Trockenperiode von Mitte Mai bis Mitte Juni 2023 sowie eine zweite ausgeprägte Trockenperiode von Anfang September bis Mitte Oktober mit starker Sonneneinstrahlung. Frühling und Sommer waren jedoch bis auf die Trockenperioden von zahlreichen, regelmäßigen und regenreichen Niederschlägen geprägt. Im Zeitraum 24.08. – 29.08.2023 gab es eine Unwetterphase mit Hagel und sehr hohen Niederschlagsmengen.

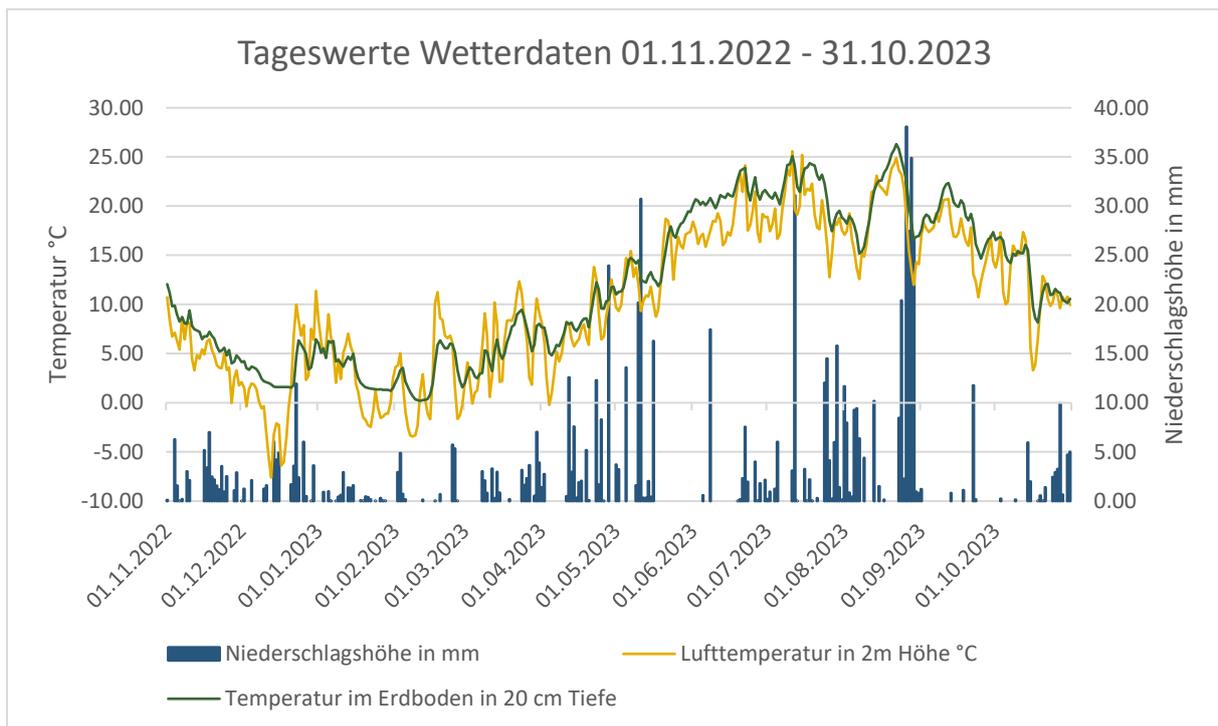


Abbildung 11. Witterungsverlauf für den Standort Dürnast. Tagesmittelwerte vom 01.11.2022 bis 31.10.2023 mit Niederschlägen (blau), mittlere Lufttemperatur (orange) und mittlere Bodentemperatur in 20 cm Tiefe (grün). Datenquelle: DWD, 2023

3.2.4 Allgemeine Entwicklungen und Beobachtungen Versuchsreihe 1

Versuchsjahr 2020

T. cordata weist nach der ersten Vegetationsperiode des Versuchs einen sehr heterogenen Zuwachs auf. Ggf. kann ein geringerer Zuwachs mit zu tiefer/zu hoher Pflanzung erklärt werden. *P. hispanica* weist einen deutlich größeren Zuwachs als *T. cordata* über den betrachteten Zeitraum auf. Bei *P. hispanica* sind die Differenzen im Zuwachs zwischen den unterschiedlichen Pflanzvarianten signifikanter als bei *T. cordata*. Die Differenzen scheinen u.a. mit dem Ausfall der Bewässerungstechnik für den Zeitraum 19.06.2020 – 25.06.2020 zusammenzuhängen, der offensichtlich insbesondere bei für *P. hispanica* in Pflanzgefäßen kurzfristig zu einem starken Trockenstress führte. Besonders stark ausgeprägt war der Trockenstress bei großen Platanen (STU 12cm) mit einer großen Blattmasse. Die Reaktion auf den Trockenstress waren Blattwelke und Blattabwurf (bis zu ca. 90% der Blätter). Der Unterschied in der Blattmasse und somit in der Verdunstungsleistung können als Ursache für den ausgeprägten Trockenstress (Blattabwurf) bei *P. hispanica* im Vergleich zu *Tilia cordata* angesehen werden (s. im Anhang Abbildung 12 und Abbildung 13). Im Boden verpflanzte *P. hispanica* waren von dem Trockenstressereignis ebenfalls sehr viel weniger betroffen. Vom Trockenstress betroffene Bäume haben sich bis zum Ende der Vegetationsperiode 2020 erholt und sind weiterhin für den Pflanzenversuch repräsentativ.



Abbildung 12. Beispiel eines Wachstumsverlaufs von *T. cordata* in einem gedämmten Pflanzgefäß von links nach rechts: 12.05., 26.06., 30.06., 07.07., 24.07., 08.09., 08.10. und 22.10.2020



Abbildung 13. Beispiel eines Wachstumsverlaufs von *P. hispanica* in einem gedämmten Pflanzgefäß von links nach rechts: 12.05., 26.06., 30.06., 07.07., 24.07., 08.09., 08.10. und 22.10.2020

Nach dem ersten Versuchsjahr fiel nur eine *P. hispanica* direkt nach der Pflanzung aus. Der Ausfall ist vermutlich auf nicht visuelle Verletzung durch die Rodung, den Transport oder die Pflanzung selbst und den daraus resultierenden Stress für den Baum zurückzuführen.

Versuchsjahr 2021

Die Ergebnisse in der Vegetationsperiode 2020/2021 umfassen die Versuchsreihe 1. Aussagekräftige Ergebnisse für Versuchsreihe 2 können erst am Ende der Vegetationsperiode 2021/2022 erwartet werden, daher werden hier keine Ergebnisse zur Vegetationsperiode 2020/2021 präsentiert.

Alle Bäume in Versuchsreihe 1 wiesen in der zweiten Vegetationsperiode ein signifikant stärkeres Wachstum auf als in der ersten Vegetationsperiode. Dies ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf den überwundenen Pflanzschock von der ersten Vegetationsperiode zurückzuführen. Einen ersten visuellen Einblick gibt die untenstehende Abbildung 14. Das linke Bild zeigt die Versuchsfläche am Versuchsbeginn im Mai 2020. Alle Bäume wurden vor der Pflanzung zurückgeschnitten, so hatten sie alle im Durchschnitt eine ähnliche Kronengröße. Das rechte Bild zeigt die Versuchsfläche bzw. die Entwicklung der Bäume im zweiten Vegetationsjahr (Bildaufnahme im Juli 2021).



Abbildung 14. Das Bild links zeigt die Versuchsfläche am Anfang des Experimentes (Mai 2020). Das Bild rechts stellt das Wachstum der Bäume im zweiten Versuchsjahr dar (Juli 2021)

Winterlinden (Abbildung 15) wiesen nach der zweiten Vegetationsperiode des Versuchs einen sehr heterogenen Zuwachs auf. Große Unterschiede im Zuwachs von Winterlinden waren dabei zwischen Pflanzgefäßpflanzungen und Bodenpflanzungen zu beobachten. Platanen (Abbildung 16) wiesen einen deutlich größeren Zuwachs als Winterlinden auf. Bei Platanen waren die Differenzen im Zuwachs zwischen den unterschiedlichen Pflanzvarianten deutlicher als bei Winterlinden. Es gab stärkere Reaktionen auf den implementierten Trockenstress bei Platanen als bei Winterlinden. Die Reaktionen auf den Trockenstress waren Blattwelke und Blattabwurf (bis zu ca. 10% der Blätter bei *P. x hispanica*). Der Unterschied in der Blattfläche und somit in der Verdunstungsleistung können als Ursache für den ausgeprägten Trockenstress (Blattabwurf) bei Platanen im Vergleich zu Winterlinden angesehen werden. Im Boden verpflanzte Platanen waren von der Trockenstressbewässerung sehr viel weniger betroffen.



Abbildung 15. Beispiel des Wachstumsverlaufs von *T. cordata* in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert in der Vegetationsperiode 2021.



Abbildung 16. Beispiel des Wachstumsverlaufs von *P. hispanica* in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert in der Vegetationsperiode 2021

In der Vegetationsperiode 2021 starb eine Winterlinde im Pflanzgefäß im Boden ab (Baumnummer 126). Der Baum wies schon in der ersten Vegetationsperiode ein sehr geringes Wachstum auf, das sich in der zweiten Vegetationsperiode nicht veränderte. Die betroffene Winterlinde war mit einem Bodenfeuchte- und Temperatursensor sowie einem Saftflusssensor ausgestattet. Der Ausfall ist vermutlich auf eine äußerlich nicht erkennbare Verletzung durch die Rodung, den Transport oder die Pflanzung selbst zurückzuführen. Der Ausfall bedeutet, dass bei diesem Baum keine weiteren Daten zum Saftfluss für Winterlinden im Pflanzgefäß im Boden erhoben werden können. Für die Bodenfeuchte- und Temperaturmessungen bedeutet dies, dass nur noch anhand einer Winterlinde im Pflanzgefäß im Boden Daten erhoben werden können. Im gesamten Versuchszeitraum wurden und werden keine Kronen- oder Wurzelschnitte vorgenommen.

Versuchsjahr 2022

Alle Bäume in Versuchsreihe 1 wiesen in der dritten Vegetationsperiode weiterhin ein starkes Wachstum auf, ähnlich zu dem in der zweiten Vegetationsperiode. Einen ersten visuellen Einblick gibt die untenstehende Abbildung 17. Das linke Bild zeigt die Versuchsfläche am Versuchsbeginn im Juni 2020. Alle Bäume wurden vor der Pflanzung zurückgeschnitten, so hatten sie alle im Durchschnitt eine ähnliche Kronengröße. Das Bild in der Mitte zeigt die Versuchsfläche bzw. die Entwicklung der Bäume im zweiten Vegetationsjahr (Bildaufnahme im Juli 2021) und die erkennbar deutliche Zunahme im Kronenvolumen. Das rechte Bild zeigt die Versuchsfläche im dritten Versuchsjahr (Juni 2022). Hier ist der eintretende Kronenschluss der Bäume sowie die stark erhöhte Beschattung der Versuchsfläche durch die Bäume zu erkennen.



Abbildung 17. Das Bild links zeigt die Versuchsfläche am Anfang des Experimentes (Juni 2020). Das Bild in der Mitte stellt das Wachstum der Bäume im zweiten Versuchsjahr dar (Juli 2021) und das rechte Bild zeigt die Bäume im dritten Versuchsjahr (Juni 2022).

Winterlinden (Abbildung 18) wiesen nach der dritten Vegetationsperiode des Versuchs einen sehr heterogenen Zuwachs auf. Große Unterschiede im Zuwachs von Winterlinden waren dabei zwischen Pflanzgefäßpflanzungen und Bodenpflanzungen sowie zwischen Trockenstress und Optimalbewässerung im Pflanzgefäß zu beobachten. Winterlinden mit Trockenstress während der zweiten Vegetationsperiode 2021 wiesen zu Beginn der dritten Vegetationsperiode deutlich kleinere Kronen auf als Winterlinden mit Optimalbewässerung. Diese Differenz in der Kronenausbildung wurde durch die Trockenstressbehandlung während des dritten Versuchsjahres weiter verstärkt. Besonders aufgefallen war die signifikante Reaktion der Winterlinden im Pflanzgefäß mit Trockenstress auf den zusätzlichen Hitzestress zwischen 11.07.2022 und 18.07.2022. Dies hatte bei den betroffenen Winterlinden einen Blattverlust von 20 – 30% zur Folge. Platanen im Boden wiesen einen deutlich größeren Zuwachs als Winterlinden im Boden auf. Bei Platanen im Pflanzgefäß war der Zuwachs nur leicht stärker ausgeprägt als bei Winterlinden im Pflanzgefäß. Die im letzten Jahr festgestellt stärkere Reaktionen auf den implementierten Trockenstress bei Platanen, blieb dieses Jahr aus, da direkt mit Beginn des Blattaustriebs Trockenstress implementiert wurde. Platanen im Pflanzgefäß (Abbildung 19) zeigten wiederum eine deutlich geringere Reaktion in Form von keinem Blattverlust und nur Blattwelke bis minimaler Blattverlust unter 10 % auf den zusätzlichen Hitzestress im Zeitraum vom 11.07. – 18.07.2022. Im Boden verpflanzte Bäume beider Arten waren von der Trockenstressbewässerung sowie dem zusätzlichen Hitzestress sehr viel weniger betroffen.



Abbildung 18. Beispiel des Wachstumsverlaufs von *T. cordata* in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2022.



Abbildung 19. Beispiel des Wachstumsverlaufs von *P. hispanica* in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2022.

In der Vegetationsperiode 2022 hatte die Winterlinde mit der Baumnummer 3 (im Boden mit Trockenstress) im Zeitraum 11.07.2022 bis 28.07.2022 einen totalen Blattverlust, vermutlich ebenso als Reaktion auf den zusätzlichen Hitzestress, konnte sich aber bis zum Ende der dritten Vegetationsperiode mit neuem Blattaustrieb wieder erholen. Während dem dritten Versuchsjahr sind 4 Bodenfeuchte und –temperatursensoren ausgefallen. Betroffen sind die Sensoren mit Nummern 1, 5, 3i und 13i. Der Sensor 1 (Winterlinde im Boden mit Trockenstress, Baumnummer 108) war bereits am 20.11.2021 ausgefallen und somit für die Vegetationsperiode 2022 nicht brauchbar. Sensor 5 (Winterlinde im Boden mit Optimalbewässerung, Baumnummer 96) fiel am 11.10.2022 aus. Der aufgezeichnete Datensatz ist somit für die Vegetationsperiode 2022 nahezu komplett und auswertbar. Sensor 3i (Winterlinde im nicht isolierten Pflanzgefäß mit Trockenstress, Baumnummer 10) fiel am 22.10.2022 aus und konnte somit noch einen kompletten und auswertbaren Datensatz für die Vegetationsperiode 2022 aufzeichnen. Der Sensor 13i (Platane im Boden mit Optimalbewässerung, Baumnummer 15) fiel am 03.10.2022 aus. Der aufgezeichnete Datensatz ist somit für die Vegetationsperiode 2022 nahezu komplett und auswertbar. Alle ausgefallenen Bodensensoren konnten am 04.03.2023 repariert werden. Somit steht für die Vegetationsperiode 2023 wieder der vollständige Datensatz zur Verfügung. Durch bereits erwähnten Ausfall der Winterlinde im Pflanzgefäß im Boden (Baumnummer 126) während der Vegetationsperiode 2021 bedeutet dies, dass sich die voll funktionsfähigen Bodensensoren auf von 32 auf 31 reduziert haben. Ein doppelter Ausfall von Sensoren für eine Pflanzenvariante ist damit bisher noch nicht aufgetreten. Der Ausfall der Sensoren ist wahrscheinlich auf eine Beschädigung durch Tiere zurückzuführen, die die oberirdischen Kabel der Sensoren durchgebissen haben. Oberirdische Schäden können behoben werden, unterirdische jedoch nicht, denn ein Austausch oder eine Neuinstallation der Sensoren ist nicht möglich, da dafür die Bäume ausgetopft oder ausgegraben werden müssten und dies einen zu starken Eingriff mit erheblichen Auswirkungen auf den laufenden Versuch darstellt. Im gesamten Versuchszeitraum wurden und werden keine Kronen- oder Wurzelschnitte vorgenommen.

Versuchsjahr 2023

Bäume im Boden in der Versuchsreihe 1 wiesen in der vierten Vegetationsperiode weiterhin ein starkes Wachstum auf, ähnlich zu dem in der dritten Vegetationsperiode. Bäume im Pflanzgefäß im Boden hatten deutlich unterschiedliche Zuwachsraten. Platanen wiesen teilweise ein sehr starkes Wachstum auf oder stagnierten im Wachstum. Bei Winterlinden war dieser Unterschied in den Wachstumsraten weniger ausgeprägt als bei Platanen. Platanen in oberirdischen Gefäßen stagnierten deutlich im Wachstum. Winterlinden in oberirdischen Gefäßen wiesen ein leicht höheres Wachstum als Platanen auf. Diese Beobachtungen legen nahe, dass die Bäume in der vierten Vegetationsperiode die maximal mögliche Größe nahezu erreicht haben und dass die Pflanzgefäße entsprechend stark durchwurzelt sind, mit nur noch wenig Platz für neue Wurzelbildung. Aufgrund des weiterhin stark ausgeprägten Wachstums der Bäume im Boden entstand auf der Versuchsfläche Konkurrenzdruck im Kronenbereich der Bäume. Einen ersten visuellen Einblick gibt die untenstehende Abbildung 20, die den Entwicklungsverlauf der Versuchsfläche über die Versuchsjahre 2020, 2021, 2022 und 2023 (von links oben nach rechts unten) darstellt. In den Versuchsjahren 2022 und 2023 ist der eintretende Kronenschluss der Bäume sowie die stark erhöhte Beschattung der Versuchsfläche durch die Bäume zu erkennen.



Abbildung 20. Das Bild links oben zeigt die Versuchsfläche am Anfang des Experimentes (Juni 2020). Das Bild oben rechts stellt das Wachstum der Bäume im zweiten Versuchsjahr dar (Juli 2021), unten links zeigt die Bäume im dritten Versuchsjahr (Juni 2022) und unten rechts im dritten Versuchsjahr (Juni 2023).

Winterlinden (Abbildung 21) wiesen nach der vierten Vegetationsperiode des Versuchs einen sehr heterogenen Zuwachs auf. Große Unterschiede im Zuwachs von Winterlinden waren dabei zwischen Pflanzgefäßpflanzungen und Bodenpflanzungen sowie zwischen Trockenstress und optimal Bewässerung im Pflanzgefäß zu beobachten. Winterlinden mit Trockenstress während der dritten Vegetationsperiode 2022 wiesen zu Beginn der vierten Vegetationsperiode deutlich kleinere Kronen auf als Winterlinden mit optimal Bewässerung. Diese Differenz in der Kronenausbildung wurde durch die Trockenstressbehandlung während des vierten Versuchsjahres weiter verstärkt und zeigte sich auch in der Blattgröße. Platanen im Boden wiesen einen deutlich größeren Zuwachs als Winterlinden im Boden auf. Bei Platanen im Pflanzgefäß war der Zuwachs leicht schwächer ausgeprägt als bei Winterlinden im Pflanzgefäß. Platanen im Pflanzgefäß (Abbildung 22) mit Trockenstress wiesen ebenfalls eine kleinere Krone sowie eine kleinere Blattgröße auf als Platanen in Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung.



Abbildung 21. Beispiel des Wachstumsverlaufs von *T. cordata* in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2023.



Abbildung 22. Beispiel des Wachstumsverlaufs von *P. hispanica* in einem nicht isolierten Pflanzgefäß optimal bewässert (oben) und in Trockenstress (unten) während der Vegetationsperiode 2023.

Die, während dem dritten Versuchsjahr ausgefallenen 4 Bodenfeuchte und –temperatursensoren mit den Nummern 1, 5, 3i und 13i, konnten alle am 04.03.2023 repariert werden. Somit standen für die Vegetationsperiode 2023 wieder der vollständige Datensatz der Bodensensoren zur Verfügung. Im Zeitraum zwischen dem 03.07.2023 und dem 09.07.2023 gab es eine Leckage an einem Rohrverbinder, die die Bäume in Pflanzgefäßen im Trockenstress in den Reihen 1, 2 und 3 betraf. Die Leckage beeinflusste die Bäume unterschiedlich stark. Bäume im Pflanzgefäß im Boden wiesen tendenziell einen Blattverlust von ca. 50% auf. Bäume in oberirdischen Pflanzgefäßen erlitten einen Blattverlust von 95 – 100%. Der beobachtete Unterschied im Blattverlust ist stark darauf zurückzuführen, dass die Bäume in Pflanzgefäßen im Boden teilweise mit ihren Wurzeln in das angrenzende Erdreich wuchsen (Abbildung 23). Die betroffenen Bäume erholten sich von den Trockenschäden nur langsam und waren damit ab dem Zeitpunkt für die Auswertung des Baumwachstums nicht mehr verwertbar.



Abbildung 23. Wurzelflucht bei Platane im Pflanzgefäß im Boden in das angrenzende Erdreich.

Im Zeitraum zwischen 24.08.2023 und 29.08.2023 gab es eine Unwetterperiode mit sehr starkem Hagelschlag und sehr hohen Windgeschwindigkeiten. Diese Unwetterperiode hatte zur Folge, dass einige Bäume in Pflanzgefäßen umkippten und dabei das Befestigungssystem für die Bäume stark beschädigt wurde. Bis auf einzelne abgebrochene Zweige hatte der starke Wind keine Schäden an den Bäumen verursacht. Ein deutlich höheres Schadensbild verursachte der Hagelschlag. Die Blätter an der Westseite aller Bäume wurden durchlöchert und wiesen somit nur noch eine minimale, nicht messbare Photosynthese- und Verdunstungsleistung auf. Zudem erlitten Platanen durch den Hagelschlag deutliche Schäden an der Rinde, die den Saftfluss bis zur Überwallung der aufgeplatzten Stellen beeinträchtigt. Aufgrund der entstanden Schäden, besonders am Laub, sind alle weiteren Messungen zum Baumwachstum bis zum Ende der Vegetationsperiode 2023 nicht aussagekräftig.

Durch die Stromausfälle in den Zeiträumen 11.09.2023 bis 15.09.2023 und 19.09.2023 bis 20.09.2023 erübrigten sich alle weiteren Messungen zum Baumwachstum, da der sehr verfrühen Blattabwurf aller Bäume in Pflanzgefäßen (Versuchsreihe 1 und 2) als Reaktion auf den dramatischen Trockenstress, kein Baumwachstum bis zum Ende der Vegetationsperiode 2023 zu ließ. Aussagen zum Zeitpunkt des Laubfalls können somit auch nicht getroffen werden. Im gleichen Zeitraum konnte ohne die Stromversorgung auch keine Messdaten durch Bodensensoren erhoben werden. Aufgrund der geschilderten Vorfälle und Unwetter sind die erhobenen Daten zur Blattphänologie während des Versuchsjahres 2023 nur bedingt aussagekräftig. Daher konzentriert sich die Berichterstattung für das Versuchsjahr 2023 auf den Brusthöhendurchmesserzuwachs und die Wurzelanalyse. Die Daten zu Blattphänologie und zur Verdunstungsleistung werden mit den erwähnten Einschränkungen präsentiert. Im gesamten Versuchszeitraum wurden und werden keine Kronen- oder Wurzelschnitte vorgenommen.

3.2.5 Allgemeine Entwicklungen und Beobachtungen Versuchsreihe 2

Versuchsjahr 2022

Alle Bäume in Versuchsreihe 2 wiesen in der zweiten Vegetationsperiode ein deutlich stärkeres Wachstum im Vergleich zur ersten Vegetationsperiode auf. Dieses Phänomen konnte schon für die erste Versuchsreihe nach der zweiten Vegetationsperiode beobachtet werden. Einen ersten visuellen Einblick gibt die untenstehende Abbildung 24. Das linke Bild zeigt die Versuchsfläche am Versuchsbeginn im Juni 2021. Alle Bäume wurden vor der Pflanzung zurückgeschnitten, so hatten sie alle im Durchschnitt eine ähnliche Kronengröße. Das rechte Bild zeigt die Versuchsfläche bzw. die Entwicklung der Bäume im zweiten Vegetationsjahr (Bildaufnahme im Juni 2022) und die erkennbar deutliche Zunahme im Kronenvolumen.



Abbildung 24. Wachstumsentwicklung der Versuchsreihe 2. Das linke Bilde zeigt die zweite Versuchsreihe im Juni 2021 und das rechte Bild im Juni 2022.

Platanen in den Pflanzgefäßen von Plantener (Abbildung 25) hatten den größten Zuwachs während der Vegetationsperiode 2022. Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün und in nicht isolierten Pflanzgefäßen wiesen einen ähnlichen Zuwachs auf. Es ist jedoch anhand der Fotos von August und September 2022 zu erkennen, dass der Hitzestress im Juli 2022 keine negative Auswirkung auf Platanen in Pflanzgefäßen von Plantener und Optigrün hatte. Diese Beobachtung deckt sich auch mit der Blattzählung. Diese Beobachtung deutet an, dass die integrierten Wasserreservoirs in den Pflanzgefäßen von Plantener und Optigrün in der Lage sind, auch bei sehr hohem Wasserbedarf während einer Hitzeperiode ausreichend Wasser zur Verfügung zu stellen, so dass der Baum nicht mit Blattwelke oder Blattverlust auf mögliche Wasserknappheit reagieren muss. Diese Beobachtung deckt sich ebenfalls mit den Messdaten der Substratfeuchte. Dieser Unterschied ist insofern bemerkenswert, als dass Versuchsreihe während der Vegetationsperiode 2022 optimal bewässert wurde. Dies verdeutlicht, dass trotz optimaler Bewässerung während trockener und heißer Sommerphasen ein Trockenstress für den Baum im Pflanzgefäß entstehen kann.



Abbildung 25. Wachstumsverlauf von *P. hispanica* in der Versuchsreihe 2 in den Pflanzgefäßen von Optigrün (oben), Plantener (mitte) und nicht isolierten Pflanzgefäßen (unten) der Vegetationsperiode 2022.

In der zweiten Versuchsreihe gab es keine Ausfälle bei den Bäumen und den Sensoren. Im gesamten Versuchszeitraum wurden und werden keine Kronen- oder Wurzelschnitte vorgenommen.

Versuchsjahr 2023

Alle Bäume in Versuchsreihe 2 wiesen in der dritten Vegetationsperiode ein ähnlich starkes Wachstum im Vergleich zur zweiten Vegetationsperiode auf. Dieses Phänomen konnte schon für die erste Versuchsreihe nach der dritten Vegetationsperiode beobachtet werden. Einen ersten visuellen Einblick gibt die untenstehende Abbildung 26. Das linke Bild zeigt die Versuchsfläche am Versuchsbeginn im Juni 2021. Das mittlere Foto zeigt die Versuchsfläche in der Vegetationsperiode 2022 und das rechte Bild die Entwicklung der Bäume im dritten Vegetationsjahr 2023.

Platanen in den Pflanzgefäßen von Plantener (Abbildung 27) hatten den größten Zuwachs während der Vegetationsperiode 2023. Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün und in nicht isolierten Pflanzgefäßen wiesen einen ähnlichen Zuwachs auf, wobei Platanen in nicht isolierten Gefäßen einen leicht höheren Zuwachs aufwiesen. Diese Beobachtung deckt sich auch mit der Blattzählung. Diese Beobachtung deutet an, dass die integrierten Wasserreservoirre im Pflanzgefäß von Optigrün während der regenreichen Witterung im Sommer 2023 keine positive Auswirkung auf das Wachstum hatte im Vergleich zum nicht isolierten Pflanzgefäß. Die Wachstumsunterschiede sind daher eher auf die leicht unterschiedlichen Pflanzgefäßvolumen von 50 L (Optigrün) und 52 L (nicht isoliertes Pflanzgefäß) zurückzuführen, da die Platanen während der dritten Vegetationsperiode die Pflanzgefäße schon sehr stark durchwurzelt hatten.



Abbildung 26. Wachstumsentwicklung der Versuchsreihe 2. Das linke Bilde zeigt die zweite Versuchsreihe im Juni 2021 und das rechte Bild im Juni 2022



Abbildung 27. Wachstumsverlauf von *P. hispanica* in der Versuchsreihe 2 in den Pflanzgefäßen von Optigrün (oben), Plantener (Mitte) und nicht isolierten Pflanzgefäßen (unten) der Vegetationsperiode 2023.

Die zweite Versuchsreihe war ebenso wie Versuchsreihe 1 von dem Unwetter Ende August 2023 sowie den Stromausfällen im September 2023 betroffen. Aufgrund der Stromausfälle konnte beobachtet werden, welchen Beitrag das integrierte Wasserreservoir in den Pflanzgefäßen von Plantener und Optigrün zur Versorgung des Baumes leisten können (Abbildung 27). Besonders die Bäume in Pflanzgefäße von Planter wiesen einen deutlich geringen Blattverlust auf als die Bäume in Pflanzgefäßen von Optigrün und in den Standardgefäßen. Zur Vergleichbarkeit muss erwähnt werden, dass die Pflanzgefäße von Plantener über ein deutlich größeres Wasserreservoir verfügen als die Pflanzgefäße von Optigrün, da das Pflanzgefäß über ein Substratvolumen von 100 L verfügt, welches für den Versuch durch eine zusätzlich eingefügte Trennwand auf 50 L reduziert wurde. Für eine bessere Vergleichbarkeit in dieser Versuchsreihe sind daher die Daten von Bäumen in Pflanzgefäßen von Optigrün und von Bäumen in Standardgefäßen heranzuziehen. Auch hier zeigte sich, dass das integrierte Wasserreservoir im Pflanzgefäß von Optigrün für eine weniger starke Blattwelke, während dem ersten Stromausfall führte. Der zweite Stromausfall konnte jedoch nicht kompensiert werden. Im gesamten Versuchszeitraum wurden und werden keine Kronen- oder Wurzelschnitte vorgenommen.

3.2.6 Wachstumsfaktor Substrattemperatur

Versuchsreihe 1

Insgesamt schwankte die Substrattemperatur innerhalb der oberirdisch installierten Pflanzgefäße (isoliert und nicht isoliert) signifikant stärker als die Bodentemperatur im Erdreich bzw. in den unterirdisch installierten Pflanzgefäßen (Abbildung 28). Die ersten Ergebnisse zeigten auch, dass die nicht gedämmten Pflanzgefäße insbesondere im Tagesgang noch einmal deutlich größere Amplituden zeigen als die gedämmten Pflanzgefäße.

Es wird ersichtlich, dass die nicht gedämmten Pflanzgefäße sowohl im Sommer wie auch im Winter die extremsten Temperaturspitzen im Versuchsverzeichnis. So wurde in der ersten Winterperiode bis zu -8 °C in einem nicht gedämmten Pflanzgefäß gemessen. Im Sommer wurde hingegen in Versuchsjahren 2020, 2021 und 2022 an mehreren Tagen über 40 °C mit einer maximalen Substrattemperatur von 44 °C gemessen. Dies ist insofern von Bedeutung, da der optimale Substrattemperaturbereich für Wurzeln je nach Baumart zwischen $15 - 32\text{ °C}$ liegt (Martin und Ingram 1993; Watson et al. 2014; Ingram et al. 2015). Der suboptimale Temperaturbereich befindet sich zwischen $30 - 40\text{ °C}$ und führt zu reduzierter Aufnahmefähigkeit von Wasser und Nährstoffen und somit zu reduziertem Wachstum (Martin und Ingram 1993; Watson et al. 2014; Ingram et al. 2015). Substrattemperaturen über 40 °C gilt es möglichst zu vermeiden, da dieser Temperaturbereich je nach Baumart zum Wurzelsterben führen kann (Ingram et al. 2015; Watson et al. 2014; McBrayer et al. 2022; Sibley et al. 1999). Ähnliche Auswirkungen können ab Temperaturen unter -5 °C für Feinwurzeln auftreten [68]. Im gedämmten Pflanzgefäß stieg die Substrattemperatur hingegen nicht über 35 °C im Sommer und fiel im Winter nicht unter 0 °C . Das gedämmte Pflanzgefäß stellt somit in Bezug auf die Substrattemperatur einen geringen Stressfaktor für den Baum dar.

Die Substrattemperatur gemessen bei Bäumen im Boden und Bäumen in Pflanzgefäßen im Boden waren über den gesamten Versuchszeitraum nahezu identisch und stiegen im Sommer nicht über 25 °C und fielen im Winter nicht unter 0 °C . Es wird daraus ersichtlich, dass ein im Boden tendenziell die besten Wachstumsbedingungen bzgl. der Substrattemperatur hat.

Über den gesamten Versuchszeitraum konnte beobachtet werden, dass durch das Kronenwachstum jedes Jahr die Verschattung der Pflanzgefäße zunahm und in diesem Zusammenhang seltener Substrattemperaturen über 40 °C (Versuchsjahr 2022) bis gar nicht mehr (Versuchsjahr 2023) in nicht gedämmten Pflanzgefäßen registriert wurden.

Anhand der Messungen der Substrattemperatur während dem Versuchsjahr 2021 (Abbildung 29) kann sehr gut dargestellt werden, dass die Baumart (Unterschiede in Blattmorphologie, Blattanzahl und Blattfläche (Vgl. Kapitel 4.2.4., 4.2.5 und 4.2.6)) keinen messbaren Einfluss auf die Substrattemperatur hatte. Ebenso konnte nicht festgestellt werden, dass das Bewässerungsregime (optimal bewässert oder Trockenstress) einen signifikanten Einfluss auf den Tagesmittelwert der Substrattemperatur im Wurzelbereich in allen Pflanzvarianten hatte. Die Bewässerungsart kann die Substrattemperatur in Pflanzgefäßen beeinflussen, dies funktioniert jedoch nur bei ausreichender Wassermenge. Ingram et al. (2015) geben 3 L pro Tag für ein 10 L Pflanzgefäß bei 26 °C Lufttemperatur als Mindestmenge zur effektiven Substratkühlung an. Diese Bewässerungsmengen entsprächen im vorliegenden Versuch eine Wassergabe von 15 L pro Pflanzgefäß in einem Gießgang. Diese Bewässerungsmengen wurden nicht erreicht.

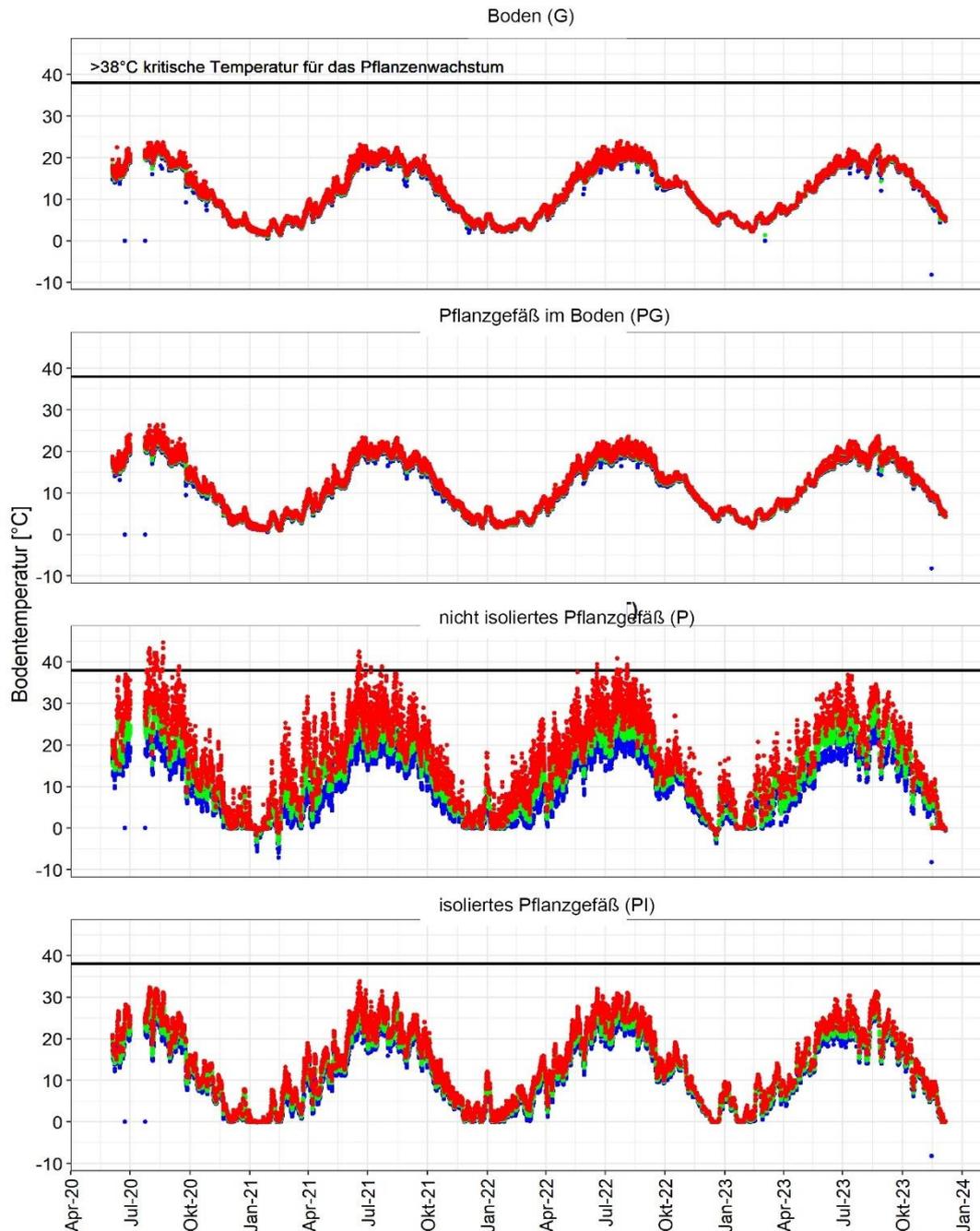


Abbildung 28. Maximal- und Minimalwerte der Substrattemperatur im Verlauf des Experimentes (Juni 2020 – Oktober 2023) in Dürnast bei Freising für vier Pflanzvarianten: Bäume im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Dargestellt werden tägliche Maximum- (rot), Mittel- (grün) sowie Minimumtemperaturen (blau) im Substrat.

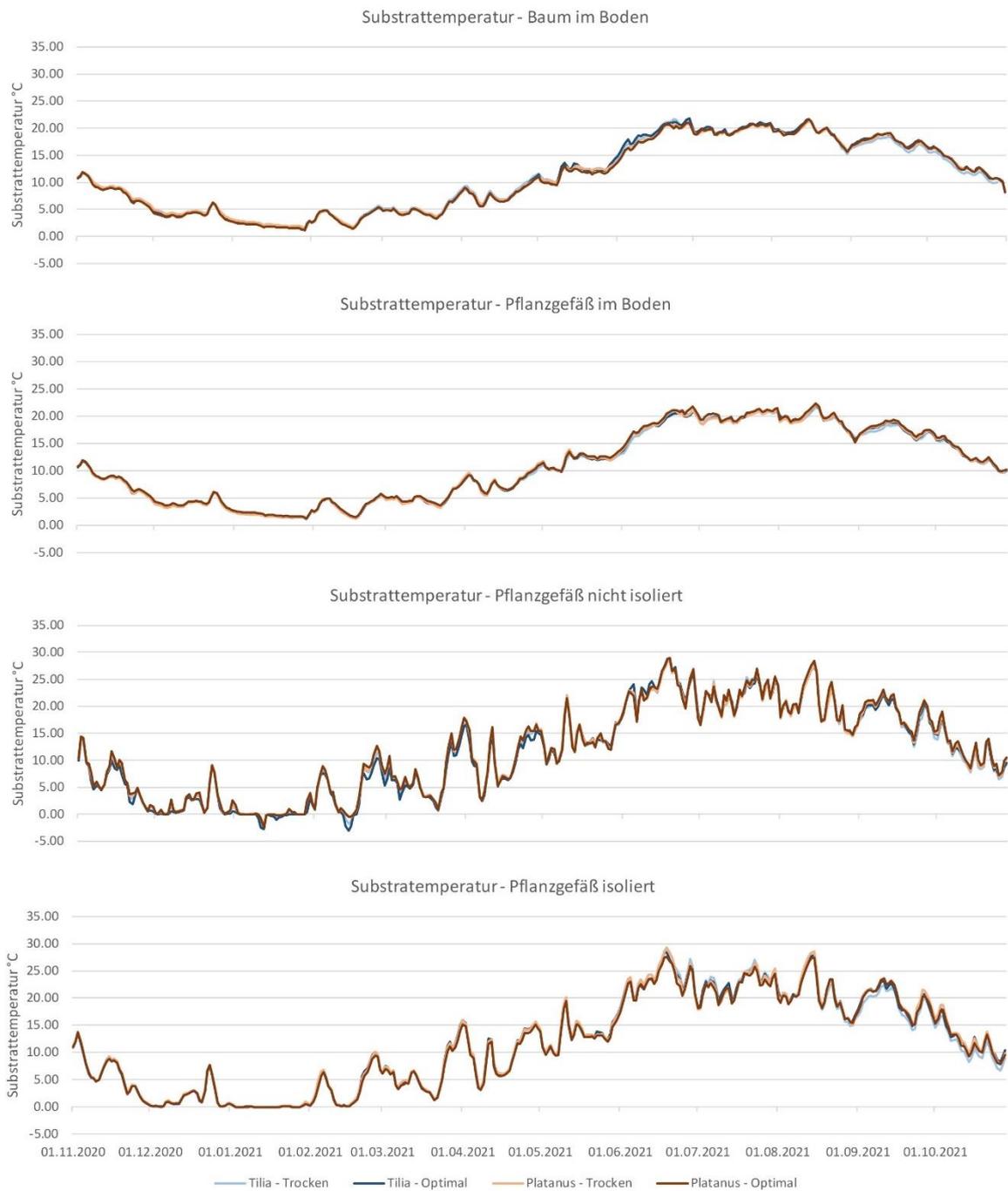


Abbildung 29. Tagesmittelwerte der Substrattemperatur (°C) in ca. 25 cm Bodentiefe (s. Abbildung 2) in den Baumgruben und Pflanzgefäßen in der Messperiode 2020-21. Zu beachten: Am 18.06.2021 wurde die Trockenstressbewässerung gestartet.

Versuchsreihe 2

Die Amplituden in der Substrattemperatur in der Versuchsreihe 2 sind nahezu überlappend mit den oberirdischen Varianten aus Versuchsreihe 1.

Wie in Versuchsreihe 1 wiesen die nicht gedämmten Pflanzgefäße in den Sommermonaten maximale Substrattemperaturen im kritischen Bereich über 40 °C auf (Abbildung 30). In Versuchsreihe 1 wiesen die nicht gedämmten Pflanzgefäße in den ersten drei Versuchsjahren ebenfalls maximal Temperaturen über 40 °C auf und erst im vierten Versuchsjahr wurden keine Temperaturen in diesem Bereich gemessen. Daher ist davon auszugehen, dass eine Verschattung des Pflanzgefäßes durch die Baumkrone erst in der Zukunft einen Effekt auf die Substrattemperatur haben wird, wenn die Baumkrone noch an Größe zugenommen hat. Zudem befindet sich die Versuchsreihe 2 auf der sonnenexponierten Süd-West-Seite der Versuchsfläche, was vermutlich zusätzlich zu einem geringeren Effekt auf die Substrattemperatur durch Verschattung zur Folge hat.

Die Pflanzgefäße von Plantener wiesen trotz einer wärmedämmenden Eigenschaft der Kapillarmatten und des doppelwandigen Pflanzgefäßes in den ersten beiden Versuchsjahren (2021 und 2022) Temperaturspitzen über 40 °C auf. Im zweiten Versuchsjahr konnten sogar maximale Temperaturen im Bereich von 45 °C gemessen werden. Damit lag die maximale Substrattemperatur in Pflanzgefäßen von Plantener sogar über der von nicht gedämmten Pflanzgefäßen. Im dritten Versuchsjahr blieb die Substrattemperatur hingegen unterhalb der 40 °C-Marke.

In den Pflanzgefäßen von Optigrün wurden nur im ersten Versuchsjahr maximale Substrattemperaturen im Bereich von 40 °C gemessen. In den folgenden Versuchsjahren blieb die Substrattemperatur teilweise deutlich unter der 40 °C-Marke. Dies ist überraschend, da aufgrund der Beschaffenheit der Pflanzgefäßwand eher ähnliche Messergebnisse wie im nicht gedämmten Pflanzgefäß zu erwarten waren. Dies kann vermutlich auf das integrierte Wasserreservoir in der Drainageschicht des Pflanzgefäßes zurückgeführt werden, da der Wasserspeicher möglicherweise einerseits einen Temperaturpuffer darstellt, der sich erst erwärmen muss, bevor das Substrat sich signifikant erwärmt und andererseits kann es sein, dass die Verdunstungskühlung des Wassers im Reservoir einen temperatursenkenden Einfluss auf das Substrat hat. Zudem muss erwähnt werden, dass der Temperatursensor in der Mitte des Pflanzgefäßes installiert wurde und somit sehr nah an der Drainageschicht und somit sehr nah am Wasserreservoir. Daher hatten vermutlich kühlende Effekte des Wasserreservoirs auf das Substrat einen direkteren Einfluss auf die Messergebnisse, als dies im Pflanzgefäß von Plantener der Fall war, in dem das Wasserreservoir durch einen doppelten Boden vom Substrat getrennt ist.

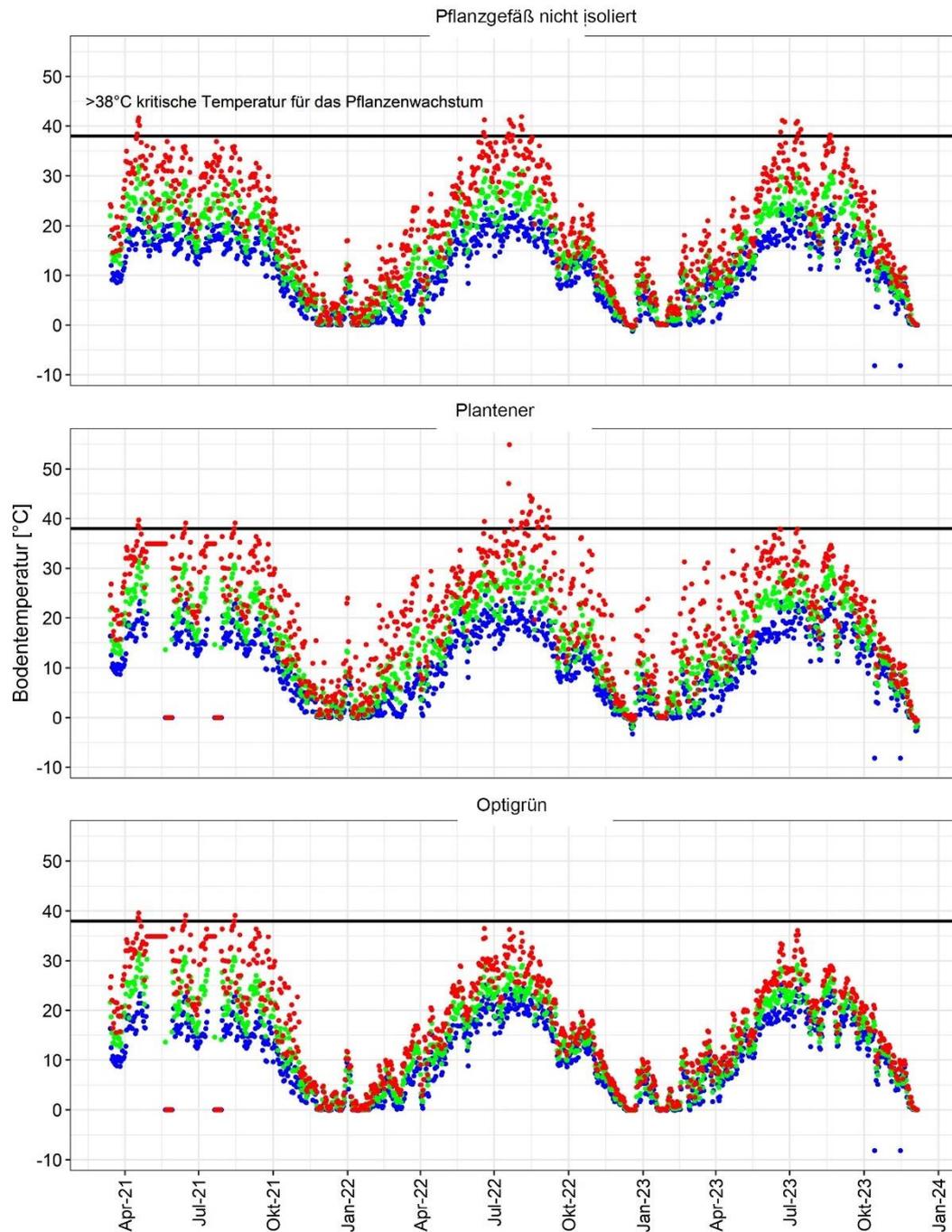


Abbildung 30. Maximal- und Minimalwerte der Substrattemperatur im Verlauf des Experimentes (April 2021 – Oktober 2023) in Dürnast bei Freising für drei Pflanzvarianten: Optigrün, Plantener und nicht isoliertes Pflanzgefäß. Dargestellt werden tägliche Maximum- (rot), Mittel- (grün) sowie Minimumtemperaturen (blau) im Substrat.

3.2.7 Wachstumsfaktor Substratfeuchte

Versuchsreihe 1

Im ersten Versuchsjahr wurden alle Bäume mit der gleichen Wassermenge gegossen, daher gibt es in den Messungen des Versuchsjahres 2020 noch keine Unterscheidung zwischen optimaler Bewässerung und Trockenstress. Der volumetrische Wassergehalt war bei identischen Rahmenbedingungen (Versuchsvarianten) für *T. cordata* meist deutlich höher als bei *P. hispanica* (Abbildung 31). Dies lässt sich durch die erhöhte Transpiration von *P. hispanica* erklären, die im ersten Versuchsjahr auf das deutlich schnellere Wachstum und der somit auch größeren Blattfläche von *P. hispanica* zurückzuführen ist gegenüber *T. cordata*. Dieses Muster konnte auch in den folgenden Versuchsjahren über den gesamten Versuchszeitraum beobachtet werden. Sowohl unter optimalen Bewässerungsbedingungen wie auch unter Trockenstressbedingungen (Abbildung 32).

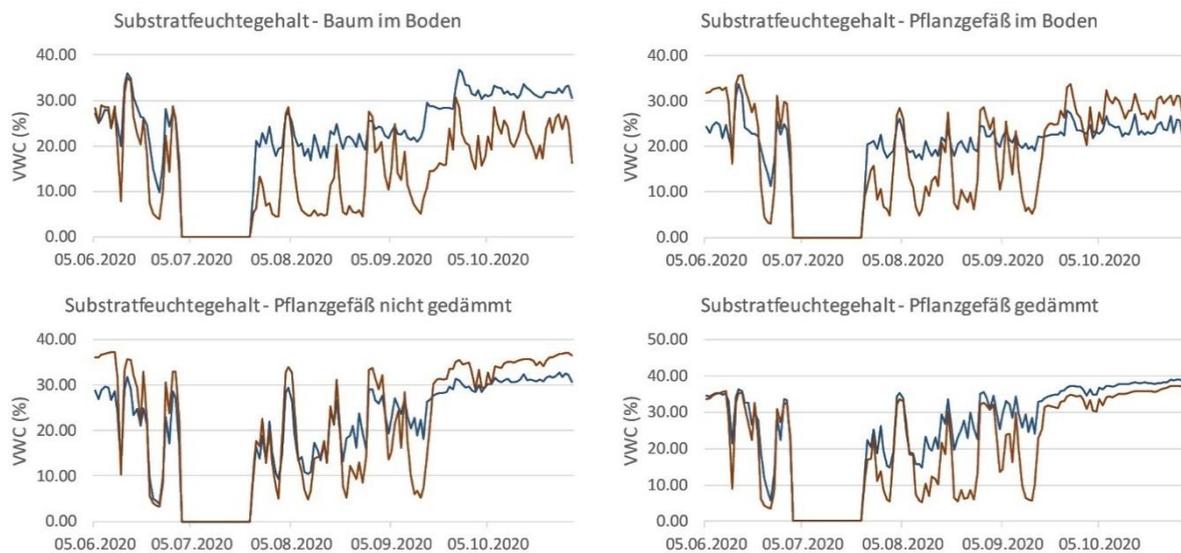


Abbildung 31. Volumetrischer Wassergehalt (VWC) % in ca. 25 cm Bodentiefe (Abb. 2) in den Baumgruben und Pflanzgefäße, die im Sommer 2020 mit *T. cordata* (blau) und *P. hispanica* (rot) im Boden (oben links), in Pflanzgefäßen im Boden (oben rechts), nicht gedämmten (unten links) und gedämmten Pflanzgefäßen (unten rechts) bepflanzt wurden. Zudem besteht aufgrund eines spät entdeckten Stromausfalls des Dataloggers eine Datenlücke zwischen dem 2. Juli und dem 24. Juli 2020.

Bei Bäumen im Boden war über den gesamten Versuchszeitraum festzustellen, dass Winterlinden im Boden einen signifikanten Unterschied im VWC zwischen Trockenstress und optimaler Bewässerung aufwiesen. Der Unterschied zwischen Trockenstress und optimaler Bewässerung war bei Platanen im Boden geringer als bei Winterlinden im Boden. Dies lässt sich wahrscheinlich auf das langsamere Wachstum und die gleichzeitig geringere Blattmasse von Winterlinden im Vergleich zu Platanen zurückführen.

Im Pflanzgefäß im Boden nahm die Ausprägung der täglichen Amplitude im Vergleich zum Baum im Boden unabhängig von der Bewässerungsart zu. Bei Winterlinden war der Unterschied zwischen Trockenstress und optimaler Bewässerung ähnlich stark ausgeprägt wie bei der Pflanzvariante Baum im Boden. Bei Platanen im Pflanzgefäß im Boden war der Unterschied im VWC zwischen optimaler Bewässerung und Trockenstress stärker ausgeprägt als bei Platanen im Boden. Das begrenzte Substratvolumen im Pflanzgefäß und somit auch die begrenzte Wasserspeicherkapazität im Pflanzgefäß hatten hier eindeutig eine Auswirkung auf den VWC.

Die Tagesamplituden des VWC für beide Bewässerungsarten waren in den oberirdischen Pflanzgefäßen (P und PI) ähnlich ausgeprägt. Die Wärmedämmung im gedämmten Pflanzgefäß hatte somit keinen signifikanten Einfluss auf den VWC. Es kann festgehalten werden, dass das Bewässerungsregime den größten Einfluss auf den VWC im Substrat hatte, unabhängig des Pflanzgefäßes und der Baumart. Bei gleichem Bewässerungsregime hatte die Baumart einen größeren Einfluss auf den VWC des Substrats als Pflanzgefäß. Das Pflanzgefäß hatte somit in der Versuchsreihe 1 nur eine untergeordnete Bedeutung für den VWC. Die Erläuterung der Messergebnisse bezieht sich hierbei vor allem auf die Vegetationsperiode des jeweiligen Versuchsjahres, da in dieser Zeit die Bäume über die künstliche Bewässerung versorgt wurden und somit auch nur dann ein Unterschied zwischen optimaler Bewässerung und Trockenstress festgestellt werden kann. Bei Pflanzgefäßen mit integrierten Wasserreservoirien hat die Beschaffenheit sehr wohl einen Einfluss auf die Substratfeuchte (vgl. Ergebnisse Versuchsreihe 2). Nach Bilderback und Fonteno [102] können deutlich unterschiedliche Geometrien des Pflanzgefäßes einen Einfluss auf die Substratfeuchte haben. Dieser Einfluss kann in unserem Versuch jedoch vernachlässigt werden, da die Geometrien der verwendeten Pflanzgefäße sehr ähnlich sind.

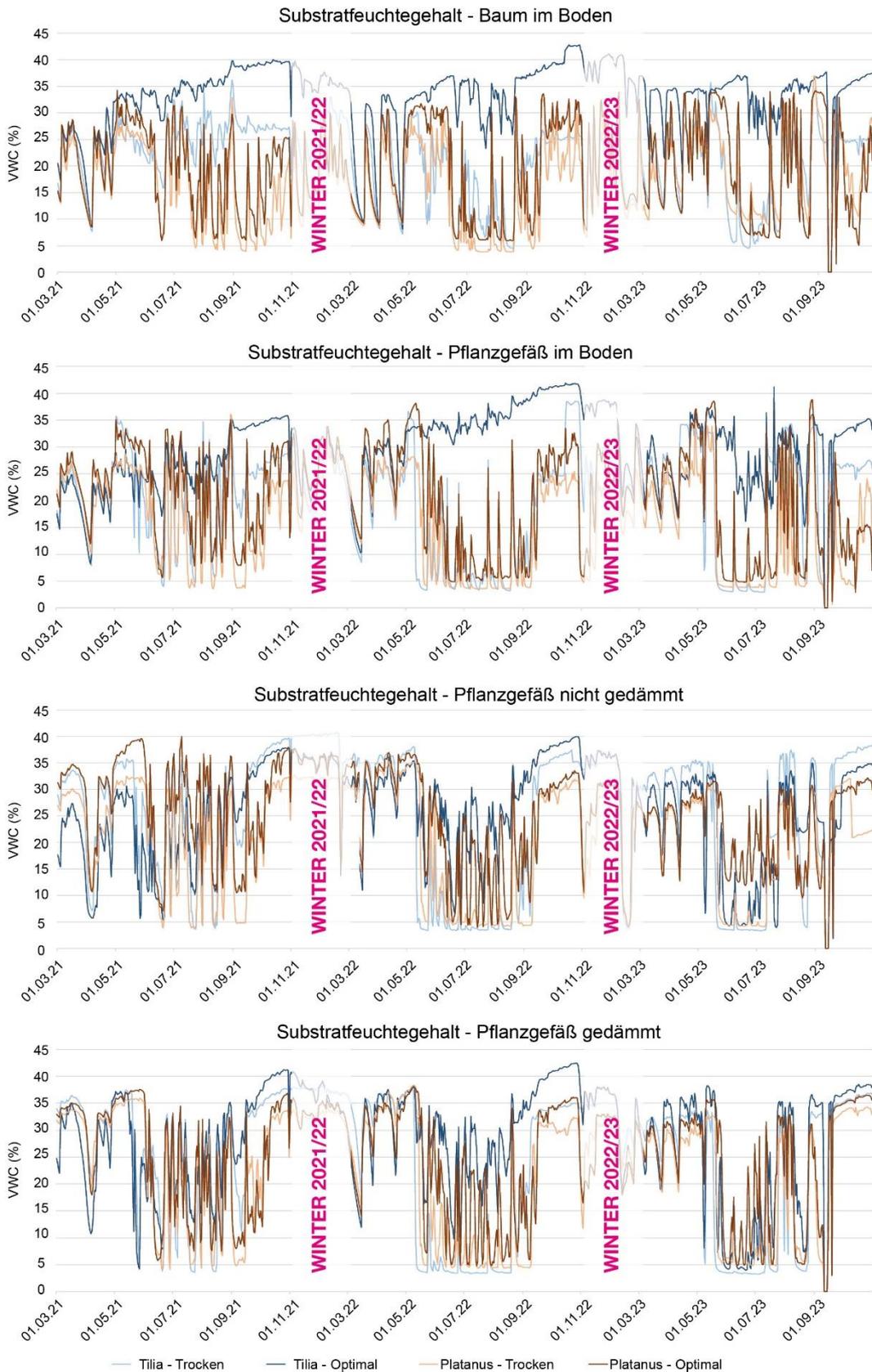


Abbildung 32. Volumetrischer Wassergehalt (VWC) % in ca. 25 cm Bodentiefe in den Baumgruben und Pflanzgefäße über den Messzeitraum März 2021 bis Oktober 2023. Zu beachten: Die Wintermonate November, Dezember, Januar und Februar sind ausgeblendet, da es in den Monaten keine künstliche Bewässerung gab und somit auch keinen signifikanten Unterschied in der Bodenfeuchte.

Versuchsreihe 2

Der volumetrische Wassergehalt (VWC) wies in den Pflanzgefäßen von Optigrün durchschnittlich die größten Amplituden auf bei gleichzeitig den längsten zeitlichen Abständen zwischen den Amplituden (Abbildung 33). Die Amplituden des VWC in den Pflanzgefäßen von Plantener fiel am geringsten aus. Zudem konnte bei Pflanzgefäßen von Plantener beobachtet werden, dass der VWC selten 10% fiel. In nicht gedämmten Pflanzgefäßen waren die Amplituden etwas stärker ausgeprägt als in Pflanzgefäßen von Plantener, wiesen jedoch meisten Messpunkte des VWC unter 10% aus.

Daraus lässt sich schließen, dass das in den Substratbereich integrierte Wasserreservoir in den Pflanzgefäßen von Optigrün einen stärkeren Einfluss auf den VWC hat als separierte Wasserreservoir mit Kapillarmatten in den Pflanzgefäßen von Plantener. Dies lässt auch die Vermutung zu, dass Trennung von Wasserreservoir und Substratbereich und die Befeuchtung des Substrats mithilfe von Kapillarmatten zu einer gleichmäßigeren Wasserabgabe und somit zu einem gleichmäßigeren VWC im Substrat führt. In nicht gedämmten Pflanzgefäßen ohne integriertes Wasserreservoir waren die Pflanzen stark der täglichen Fluktuation des VWC ausgesetzt, was eine Stressbelastung darstellen kann. Die Unterschiede in der Gleichmäßigkeit der Wasserversorgung der einzelnen Pflanzgefäße wirkte sich in unserem Versuch auf das Wachstum aus (vgl. Kapitel 4.3.1). Aufgrund eines Lesefehlers im Datenlogger konnten keine aussagekräftigen Daten für das Versuchsjahr 2021 ermittelt werden. Die erhobenen Messdaten der Versuchsjahre 2022 und 2023 sind jedoch als aussagekräftig genug zu bewerten, um Rückschlüsse auf die Wasserversorgung der untersuchten Pflanzgefäße treffen zu können.

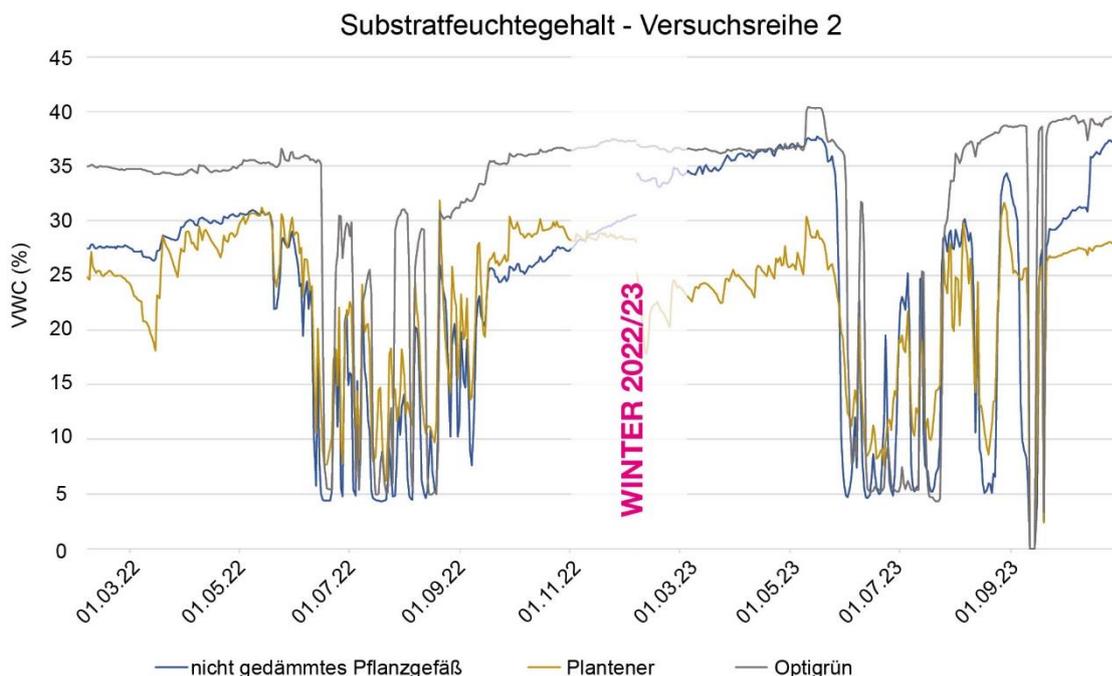


Abbildung 33. Volumetrischer Wassergehalt (VWC) (%) in ca. 25 cm Bodentiefe in den Baumgruben und Pflanzgefäße über den Messzeitraum März 2022 bis Oktober 2023 in der Versuchsreihe 2. Zu beachten: Die Wintermonate November, Dezember, Januar und Februar sind ausgeblendet, da es in den Monaten keine künstliche Bewässerung gab.

4. Arbeitspaket 2

4.1 Methodik

4.1.1 Erfassung Baumdimensionen

Beide Versuchsreihen (Versuchsreihe 1 und Versuchsreihe 2) werden seit Beginn des Experimentes hinsichtlich ihrer Baumdimensionen und ökophysiologischen Parameter aufgenommen. Zu den Baumdimensionen gehören: Durchmesser auf einer Höhe von 1,30 Meter (Brusthöhendurchmesser) und Kronenprojektionsfläche (Ausbreitung der Krone in vier Himmelsrichtungen, Abbildung 35). Eine Illustration der wichtigsten Baumdimensionen ist in Abbildung 34 zu sehen.

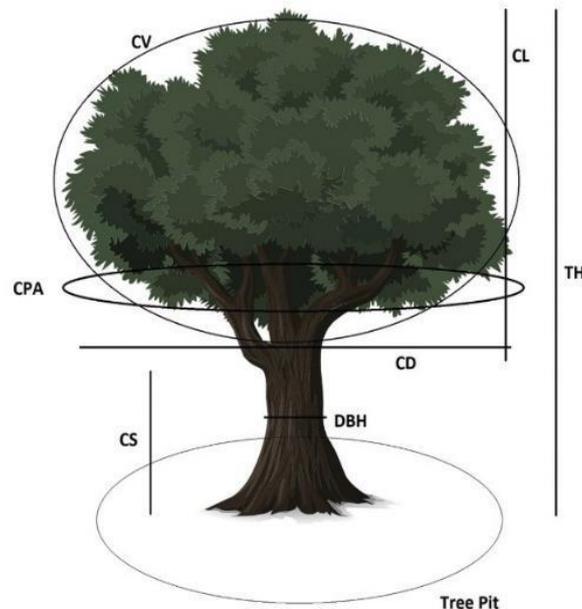


Abbildung 34. Darstellung der gemessenen Baumdimensionen: Brusthöhendurchmesser (DBH) und Kronenprojektionsfläche (CPA). Quelle: Moser-Reischl et al., 2021.

Der Durchmesser jedes Baumes wird seit Beginn des Experimentes auf 1,30 m Höhe mithilfe eines Durchmessermaßbandes (Firma Richter) gemessen. Um Messungenauigkeiten zu verringern, wurde die genaue Messstelle sowohl mit einem Marker als auch mit Klebeband markiert und alle Messungen wurden von derselben Person durchgeführt. Die Messung des Durchmessers erfolgte jeweils in den Monaten Mai, Juli und Oktober in jedem Versuchsjahr. Der Stammdurchmesser, gemessen auf einer Höhe von 1,3 Metern, spielt eine wichtige Rolle bei der Analyse des Wachstums von Bäumen. Der Stammdurchmesser steht in enger Zusammenhang mit der Baumhöhe, der Kronenschirmfläche und dem Kronenvolumen und reflektiert somit die Raumbesetzung, Ressourcenaufnahme und dem Zuwachspotenzial von Bäumen [103] und ermöglicht daher wichtige Einblicke in Wachstumsmuster.



Abbildung 35. Messung der Kronenschirmfläche einer Platane

4.1.2 Blattzählung und Berechnung der Blattfläche eines Baumes

Die Blattanzahl der Bäume wurde während der Vegetationsperiode in jedem Versuchsjahr wöchentlich beobachtet und notiert. Dabei wurden die Blätter an einem repräsentativen Ast gezählt und mit der Anzahl der Äste multipliziert. Nach dem vollständigen Blattaustrieb ab Mitte Juni wurde die Blattanzahl pro Baum alle zwei Wochen geschätzt.

Zur Berechnung der gesamten Blattfläche eines Baumes wurden zuerst am 22. Juni 2021 von jedem Baum 3-5 Blätter von der unteren, mittleren und oberen Baumkrone entnommen. Die Blätter wurden daraufhin gescannt (Abbildung 36) und anschließend mit dem Programm EasyLeafArea [104] die Blattfläche ermittelt. Die Gesamtblattfläche pro Baum errechnet sich aus der Multiplikation der mittleren Blattfläche des Baumes mit der Blattzahl des Baumes.

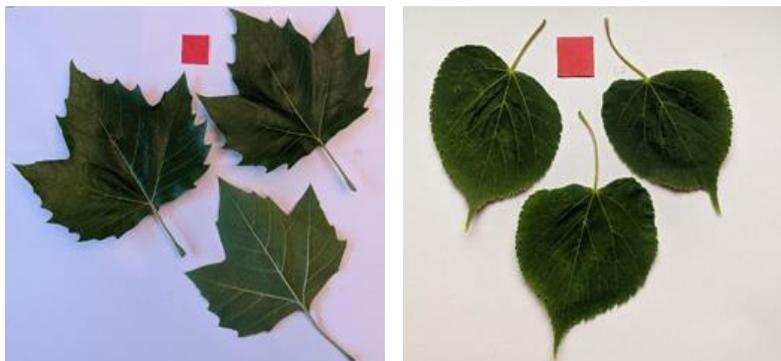


Abbildung 36. Bestimmung der Blattfläche: Blätter von Platane (*P. x hispanica*, links) und Winterlinde (*Tilia cordata*, rechts). Das rote Rechteck dient als Flächenreferenz.

4.1.3 Untersuchungen der Wurzelstrukturen und Biomassezuwachs

Zur Untersuchung der Wurzelstrukturen der Versuchsbäume wurde zur Freilegung der Baumwurzeln ein Druckluftkompressor (Hersteller: AtlasCopco; Modell: XAVS 186 JD) mit zwei Druckluftlanzen (Hersteller: Vogt; Modell: Vogtlanze VL 3,5) verwendet. Mithilfe von Druckluftlanzen kann das Erdreich im Wurzelbereich des Baumes entfernt werden, ohne dabei Schäden an der Wurzelstruktur zu verursachen. Selbst Feinwurzeln mit einem Durchmesser unter 1 mm bleiben dabei intakt (Abbildung 37).

Zur Ermittlung des Biomassezuwachs und des Biomasseverhältnisses von Baumkrone zu Wurzelstruktur wurde zum Abschluss des Experiments im Herbst 2023 ein repräsentativer Baum für jede Kombination aus Baumart, Pflanzgefäßvariante und Bewässerung ausgewählt. Die Auswahl, der zu erntenden Bäume, erfolgte unter Berücksichtigung des mittleren Durchmessers für die spezifische Pflanzkombination. Das Hauptziel bestand darin, den Biomassenzuwachs seit der Pflanzung bis zur Ernte im Jahr 2023 zu ermitteln (Abbildung 46). Dazu wurde das Frischgewicht der Bäume bei der Pflanzung im März 2020 gewogen und erneut im Oktober 2023 nach der Ernte der Bäume. Zusätzlich wurde das Trockengewicht der Bäume ermittelt, dazu wurden sie standardmäßig im Labor getrocknet.

Zur Untersuchung des Biomasseverhältnisses wurde das Gewicht für Baumkrone inklusive des Stamms und Wurzelwerk getrennt erfasst. Das Wurzelwerk der Bäume wurde zudem in Grobwurzeln (>2mm) und Feinwurzeln (<2mm) getrennt.



Abbildung 37. Freilegen der Wurzelstrukturen einer Winterlinde (*T. cordata*) im Boden durch den Einsatz von Druckluftlanzen. (Foto: Andreas Printz)

4.1.4 Messung der Baumtranspiration und Blattphysiologie

Zur Abschätzung der Baumtranspiration wurden zu Versuchsbeginn Saftflusssensoren an den Bäumen angebracht (Abbildung 38). Im zweiten Versuchsjahr, dem ersten relevanten für die Messung der Transpirationsleistung der Versuchsbäume, sind sämtliche Saftflusssensoren in den Platanen ausgefallen, da der Stammzuwachs der Platanen so groß war, dass die Sensoren eingewachsen sind und dadurch beschädigt wurden. Darüber hinaus ist ein Sensor bei den Winterlinden (*T. cordata*) aufgrund des Absterbens einer Linde ausgefallen. Die Sensorik wurde einmal wöchentliche visuell kontrolliert, sowie die Daten vom Logger exportiert. Die visuelle Kontrolle kann jedoch nur eingeschränkt erfolgen, da die Saftflusssensoren am Stamm mit einem Wärme- und Sonnenstrahlenschutz (reflektierende Folie auf Styropor) verkleidet waren. Anhand der Datenauswertung konnte festgestellt werden, dass die Sensoren ausgefallen sind, und die anschließende visuelle Kontrolle ergab das beschriebene Schadbild. Diese Ausfälle konnte durch die Verwendung von mobilen Messgeräten kompensiert werden, die darüber hinaus die Erhebung zusätzlicher Daten zur Ökosystemleistung der Bäume ermöglichten.

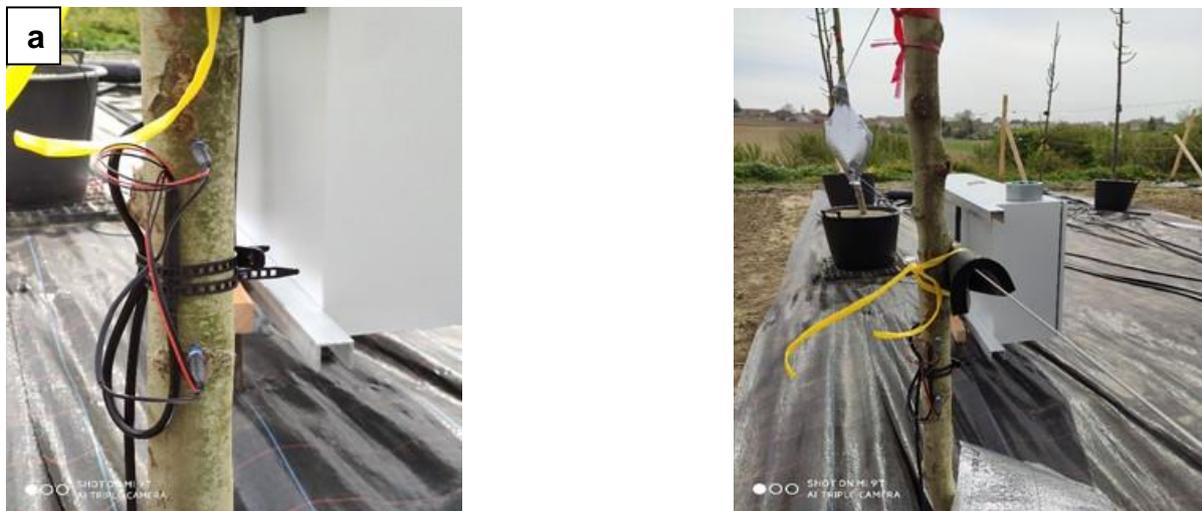


Abbildung 38. TDP-Saftflusssensoren in 0,8 - 1 m Höhe vom Boden (links). Zentraler Datenlogger, der im Inneren des Schutzkastens installiert ist, um alle Saftfluss- und Bodensensoren anzuschließen (rechts).

Die stomatäre Leitfähigkeit ist ein Maß für die von den Spaltöffnungen der Blätter ausgeübte Regulierung der Verdunstung zur Vermeidung von Wasserstress. Die Messungen der stomatären Leitfähigkeit wurden an sonnigen und warmen Tagen im Juni, Juli und August in 2021, 2022 und 2023 jeweils zwischen 11:00 und 16:00 Uhr an fünf Blättern (drei auf der Sonnenseite und zwei im Schatten) aus der mittleren Krone von vier Bäumen jeder Pflanz- und Bewässerungsvariante (64 Bäume und 320 Blätter) mit Hilfe eines Blattporometers (Modell SC-1, METER Group, Inc. USA) durchgeführt. Gleichzeitig erfolgten auch meteorologische Messungen, die die Berechnung der Evapotranspiration ermöglichen. Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit wurden gleichzeitig im Schatten der Bäume mit einem Handanemometer PCE-THA 10 (PCE-Holding GmbH, Deutschland) gemessen. Die Messungen wurden alle fünf Sekunden protokolliert und für jede Aufzeichnung der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von zwei Minuten gemittelt. Die Blatttemperaturen wurden ebenfalls mit dem Porometer zum Zeitpunkt der Messung der stomatären Leitfähigkeit aufgezeichnet. Die Luftdruckdaten für jeden Messtag wurden aus den veröffentlichten Daten der DWD-Station in Dürnast übernommen. Die Transpirationsraten (E , $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) der Blätter wurden schließlich aus der stomatären Leitfähigkeit und den meteorologischen Daten mit Hilfe des Fickschen Gesetzes berechnet, wobei $g_v \text{ total}$ die Gesamtleitfähigkeit für Wasserdampf ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),

e_{leaf} der Dampfdruck im Blattinneren ist, der als Sättigungsdampfdruck bei Blattemperatur angenommen wurde, und e_a der Dampfdruck der Atmosphäre ist, der durch Multiplikation des Sättigungsdampfdrucks bei Lufttemperatur mit der relativen Luftfeuchtigkeit berechnet wird. P_a ist der atmosphärische Druck:

$$E = g v_{\text{total}} \times (e_{\text{leaf}} - e_a) / P_a$$

Die Transpirationsrate wurde in $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ umgerechnet und mit der latenten Verdunstungswärme von $2,45 \text{ kJ g}^{-1}$ multipliziert, um den Energieverlust pro Flächeneinheit des Blattes (W m^{-2}) zu berechnen.

Das Wasserpotenzial eines Blattes ist ein Maß für den Wasserstress eines Baumes. Das Wasserpotenzial der Blätter wurde im Juli (19.07 und 20.07) und September (01.09) 2021 zwischen 12:00 und 16:00 Uhr an drei Blättern (zwei im Sonnenlicht und eines im Schatten) gemessen, die aus der mittleren Krone von zwei Bäumen jeder Stichprobe (insgesamt 32) entnommen wurden, wobei die Druckkammertechnik (Soil moisture Equipment Corp, Kalifornien, USA) angewendet wurde.

Die Chlorophylle, insbesondere Chlorophyll a und Chlorophyll b, sind die wichtigsten Pigmente für die Umwandlung von Lichtenergie in gespeicherte chemische Energie. Der relative Chlorophyllgehalt wurde mit dem Chlorophyll-Meter SPAD-502Plus (UGT, München, Deutschland) während der gleichen drei Zeitabschnitte wie die stomatäre Leitfähigkeit an fünf Blättern (drei im Sonnenlicht und zwei im Schatten) gemessen. Die relativen SPAD-Werte sind proportional zur Menge des im Blatt vorhandenen Chlorophylls, das die Photosyntheserate und das Wachstum anzeigt.

4.1.5 Simulationsmodell für Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen

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. Für diese Art der Abschätzung im Rahmen einer Planung ist ein Simulationsmodell zu Wachstum und Ökosystemleistungen von Bäumen in Pflanzgefäßen notwendig.

Mit dem bereits existierenden Simulationsmodell CityTree für Stadtbäume (vgl. Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern) können präzise Abschätzungen und Vergleiche unter verschiedenen Standortbedingungen für Bäume im Boden gemacht werden. Basierend auf diesem Simulationsmodell und unseren Messungen zur Wachstumsdynamik und Ökosystemleistungen Schattenfläche und Verdunstungskühlung von Bäumen in Pflanzgefäßen in Abhängigkeit vom Substratvolumen und der Baumart über die Zeit prognostiziert. Die wiedergegebenen Wachstumsraten für die Baumarten Platane und Winterlinde beziehen sich für die Bäume im Boden auf die Angaben von Rötzer et al. [105] und für die Bäume im Pflanzgefäß auf Dervishi et al. [82]. Die Angaben zur Verdunstungsleistung beziehen sich auf Rahman et al. [98].

Das bestehende Simulationsmodell CityTree konnte im Rahmen des Forschungsprojektes leider nicht um die Komponente des Baumes im Pflanzgefäß erweitert werden, da die Versuchsdauer von vier Jahren zu kurz ist, um eine präzise Prognose zum Wachstum und der Ökosystemleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen über den Zeitraum hinaus zu geben. Zur Erstellung eines in sich plausiblen Simulationsmodells für Winterlinde und Platane in Pflanzgefäßen über einen Zeitraum von 40 Jahren wurden anhand der Angaben von DeGaetano [27] zur Abhängigkeit von Wurzelraum, Kronenprojektionsfläche und Bewässerungsregime und unserer Messungen zur Wachstumsdynamik und Ökosystemleistung (Schattenfläche und Verdunstungsleistung) Annahmen getroffen. Die Annahmen gehen davon aus, dass ein Baum im Pflanzgefäß ein ähnlich starkes Wachstum wie ein Baum im Boden aufweist, bis ein gewisser Durchwurzelungsgrad im Pflanzgefäß

erreicht ist. Anschließend nähert sich der Baum im Pflanzgefäß langsam der theoretisch maximal möglichen Wuchsgroße im Pflanzgefäß (vgl. Kapitel 4.2.2). Die Kronenprojektionsfläche stellt im Simulationsmodell die Verschattungsfläche des Baumes dar. Die Angaben zur Verdunstungsleistung beziehen sich, basierend auf den Messergebnissen aus unseren Versuchen, auf die Angaben von Rahman et al. [98] mit 260 W/m² für Winterlinden und 300 W/m² für Platanen in Pflanzgefäßen sowie 380 W/m² für Winterlinden und 420 W/m² Platanen im Boden. Es ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den angegebenen Werten jeweils um die maximale Verdunstungsleistung handelt, da die Daten an warmen, sonnigen Sommertagen erhoben wurden. In der Simulation wird angenommen, dass die Bäume zum Pflanzzeitpunkt einen Stammumfang von 10 – 12 cm haben. Für den Baum im Pflanzgefäß wird ein Bewässerungsregime mit zwei Gießgängen pro Woche mit einem Wurzelraumbedarf von 0,1 m³/m² Kronenprojektionsfläche angesetzt [27]. Für die Platane im Boden wurde der Mittelwert für den Wurzelraumbedarf von 0,45 m³/m² von Lindsey und Bassuk [11] angenommen.

4.2 Ergebnisse Baumwachstum Versuchsreihe 1

4.2.1 Initialwerte der Baumdimensionen

Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse der ersten Messungen vor der Pflanzung im März 2020 und gibt damit die Initialwerte der gepflanzten Bäume dar. Dimensionsbezogen zeigten beide Baumarten ähnliche Werte. Platanen wiesen im Mittel einen Brusthöhendurchmesser (\pm Standardabweichung) von $3,35 \pm 0,23$ cm auf, Winterlinden einen Wert von $3,27 \pm 0,23$ cm. Beide Baumarten hatten im Mittel 10 Äste pro Stamm und der Kronenanteil an der Gesamthöhe (Kronenprozent) betrug im Mittel 53 % für Platanen und 52 % für Winterlinden. Eine detaillierte Übersicht über die Initialwerte listet die untenstehende Tabelle 3 auf.

Tabelle 2. Übersicht der Dimensionen und Gewichte von Platane und Winterlinde zur Zeit der Pflanzung Anfang März (04.03. - 11.03.2020). Dargestellt sind Mittelwert \pm Standardabweichung.

Baumart	Gewicht [kg]	Brusthöhen-durchmesser [cm]	Kronenprozent [%]	Baumhöhe [m]	Anzahl der Äste
Platanus x hispanica	3.7 ± 0.7	3.35 ± 0.23	53 ± 7	3.6 ± 0.43	10.0 ± 2.39
Tilia cordata	2.7 ± 0.3	3.27 ± 0.23	52 ± 4	3.3 ± 0.22	10.9 ± 2.63

Tabelle 3. Initialwerte über die Dimensionen der Baumarten Platane und Winterlinde und deren Pflanzvarianten, gemessen während der Pflanzzeit 04.03. - 11.03.2020 mit Mittelwert \pm Standardabweichung. Gewicht entspricht dem Baumfrischgewicht unmittelbar vor der Pflanzung, Brusthöhendurchmesser ist auf 1,3 Meter Höhe gemessen, Kronenprozent entspricht den prozentualen Anteil der Krone an Gesamtbaumhöhe.

Baumart	Pflanzvariante	Gewicht [kg]	Brusthöhen durchmesser [cm]	Baumhöhe [m]	Kronen prozent [%]	Anzahl der Äste
Platanus x hispanica	Bodenpflanzung	4.0 ± 0.7	3.41 ± 0.28	3.58 ± 0.44	53 ± 13	9.69 ± 2.8
	Pflanzgefäß isoliert	3.5 ± 0.5	3.28 ± 0.20	3.68 ± 0.47	56 ± 4	11.00 ± 1.6
	Pflanzgefäß unisoliert	3.8 ± 0.6	3.39 ± 0.20	3.58 ± 0.38	54 ± 6	10.56 ± 2.1
	Pflanzgefäß in Boden	3.6 ± 0.7	3.32 ± 0.22	3.56 ± 0.46	50 ± 5	8.75 ± 2.3
Tilia cordata	Bodenpflanzung	2.8 ± 0.4	3.26 ± 0.17	3.31 ± 0.29	51 ± 6	10.44 ± 2.3
	Pflanzgefäß isoliert	2.6 ± 0.3	3.26 ± 0.28	3.19 ± 0.18	52 ± 2	11.38 ± 3.0
	Pflanzgefäß unisoliert	2.6 ± 0.3	3.25 ± 0.25	3.34 ± 0.14	51 ± 3	10.88 ± 2.0
	Pflanzgefäß in Boden	2.9 ± 0.3	3.32 ± 0.18	3.32 ± 0.29	52 ± 4	11.00 ± 3.2

4.2.2 Entwicklung der Stammdurchmesser

Versuchsjahr 2020

Im ersten Versuchsjahr wurden wie eingangs beschrieben alle Bäume optimal bewässert, um nach dem Verpflanzungsschock möglichst gute Anwuchsbedingungen zu gewährleisten. Daher gibt es im Versuchsjahr 2020 keine Unterscheidung bei den Pflanzvarianten zwischen optimaler Bewässerung und Trockenstress.

Die höchsten Durchmesserzuwächse zeigten Platanen im Boden (grün), gefolgt von Platanen in isolierten Pflanzgefäßen (gelb) (Abbildung 39). In nicht isolierten Pflanzgefäßen (blau) und Pflanzgefäßen im Boden zeigten die Platanen einen ähnlichen Durchmesserzuwachs.

Winterlinden zeigten den höchsten Durchmesserzuwachs in isolierten (gelb) und nicht isolierten Pflanzgefäßen (blau), gefolgt von Pflanzgefäßen im Boden (rot). Im Boden gepflanzte Winterlinden wiesen den geringsten Durchmesserzuwachs auf (grün).

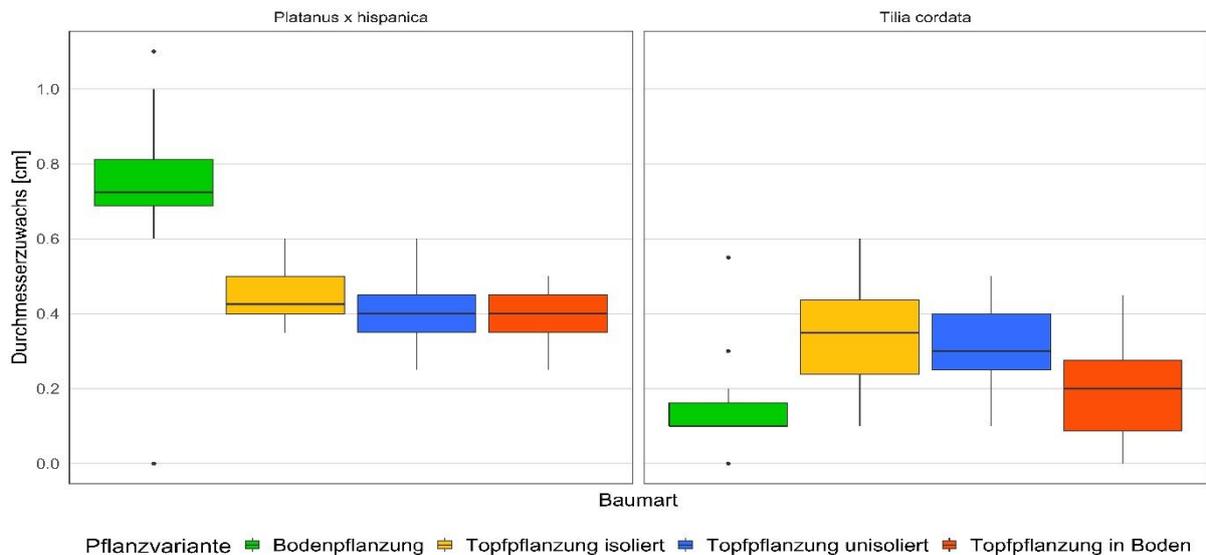


Abbildung 39. Durchmesserzuwachs über die Vegetationsperiode für die Baumarten Platane und Winterlinde gepflanzt in vier Varianten: Bodenpflanzung (grün), Pflanzgefäß gedämmt (gelb), Pflanzgefäß nicht gedämmt (blau) und Pflanzgefäß im Boden (rot).

Versuchsjahre 2021 - 2023

Im Folgenden präsentieren wir die Ergebnisse zum Gesamtdurchmesserzuwachs für die Baumarten Platane und Winterlinde in den drei Pflanzgefäßvarianten (Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P), isoliertes Pflanzgefäß (PI)) sowie im Boden (G) und unter zwei Bewässerungsbedingungen (optimale Bewässerung (O) und Trockenstress (D)). Die Daten umfassen den Durchmesser seit Beginn des Experiments im Jahr 2020 bis zum Ende im Jahr 2023 (Abbildung 40 und Tabelle 4). Zusätzlich zeigen wir den Zuwachsverlauf des Stammdurchmessers über den gesamten Versuchszeitraum (Tabelle 5 und Abbildung 41). Die Variante im Boden, als Kontrollvariante, zeigte bei der Platane einen bis zu 5-mal größeren Durchmesser, während er bei der Winterlinde im Boden 1,5-mal größer war im Vergleich zu den Pflanzgefäßvarianten.

Wie in Tabelle 4 und Abbildung 40 dargestellt, ist unter optimaler Bewässerung der Gesamtdurchmesser der Platanen im Pflanzgefäß im Boden im Durchschnitt um 37% höher als im nicht isolierten Pflanzgefäß und um 32% höher als im isolierten Pflanzgefäß. Hinsichtlich der Bewässerung zeigten Platanen einen signifikanten Unterschied, bei optimaler Bewässerung im Durchschnitt im Pflanzgefäß im Boden um 33% höher als bei Trockenstress. Unter Trockenstress wiesen beide oberirdischen Pflanzgefäßvarianten (P und PI) im Mittel

einen gleichen Gesamtdurchmesserzuwachs von 14 mm auf. Der Zuwachs war bei P um 27% und bei PI um 36% reduziert.

Unter optimaler Bewässerung wies die Winterlinde in allen drei Pflanzgefäßvarianten einen ähnlichen durchschnittlichen Gesamtdurchmesserzuwachs von etwa 25 mm auf. Bei Trockenstress zeigte die Winterlinde den größten Unterschied im nicht isolierten Pflanzgefäß mit einem reduzierten Durchmesserzuwachs von 35% im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Im Pflanzgefäß im Boden und im isolierten Pflanzgefäß war der Durchmesserzuwachs jeweils um 12% reduziert im Vergleich zur optimalen Bewässerung. Es ist anzumerken, dass in den oberirdischen Varianten (P und PI) die Winterlinde einen höheren Durchmesserzuwachs aufwies als die Platanen, und zwar um 24% im nicht isolierten Pflanzgefäß und 9% höher im isolierten Pflanzgefäß.

Es ist somit klar zu erkennen, dass das Bewässerungsregime einen starken Einfluss auf die Wachstumsdynamik von Bäumen in Pflanzgefäßen hat. Daraus kann geschlossen werden, dass eine zuverlässige Bewässerung für Bäume in Pflanzgefäßen essenziell für eine erfolgreiche Umsetzung von Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen ist.

Tabelle 4. Gesamtdurchmesserzuwachs in mm für den Zeitraum von 2020 bis 2023 bei Platane und Winterlinde in drei verschiedenen Topfvarianten und unter zwei Bewässerungsarten, mit Angaben zu Mittelwerten (MW), Standardabweichung (SD), sowie Minima und Maxima.

Baumart	Pflanzgefäß	Bewässerung	MW	SD	Min	Max
Platane	G	optimal	72,3	6,2	64,5	84,5
		trocken	71,5	4	66,5	77
	PG	optimal	32,7	5,9	23,0	38,0
		trocken	22,0	8,3	12,5	35,0
	P	optimal	20,4	1,9	18,0	23,5
		trocken	14,8	1,8	12,5	18,5
	PI	optimal	22,1	5,0	15,0	32,0
		trocken	14,5	1,4	12,0	16,5
Winterlinde	G	optimal	32,7	5,9	23	38
		trocken	22	8,3	12,5	35
	PG	optimal	25,6	3,7	19,0	29,5
		trocken	22,3	3,3	19,0	28,5
	P	optimal	25,2	1,9	23,5	28,0
		trocken	19,1	2,5	16,0	22,0
	PI	optimal	24,2	2,7	21,5	28,5
		trocken	20,1	2,2	16,5	23,0

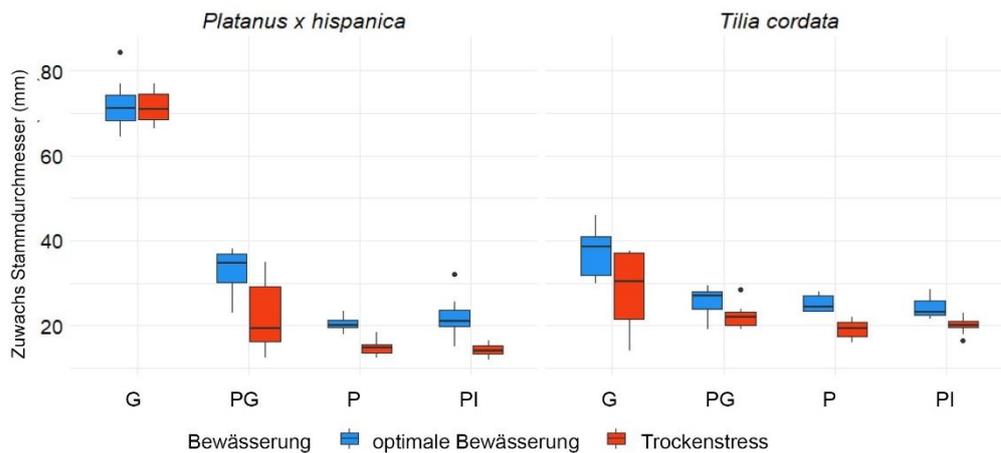


Abbildung 40. Gesamtdurchmesserzuwachs der Versuchsjahre 2020 - 2023 für links: *P. hispanica* und rechts: *T. cordata* sowie die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Die Bewässerungsvarianten sind mit blau für optimal und rot für Trockenstress dargestellt.

Der Verlauf des Durchmesserzuwachses (Abbildung 41 und Tabelle 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 Durchmesserwachstums in den drei verschiedenen Pflanzgefäßvarianten, wobei dieser Rückgang bei den Platanen deutlicher ausgeprägt ist im Vergleich zu den Winterlinden. Dies legt nahe, dass die Pflanzgefäßgröße eine potenzielle Begrenzung des Wachstums im Wurzelbereich darstellt.

Die Platane zeichnet sich durch ein schnelles Wachstum aus, während die Winterlinde als langsam wachsende Baumart bekannt ist. Dementsprechend zeigt die Platane einen größeren Stammdurchmesserzuwachs als die Winterlinde in den ersten beiden Versuchsjahren. Eventuell hat die Platane schon ihr Pflanzgefäß im Verlauf des Jahres 2021 vollständig durchwurzelt, während bei der Winterlinde Raum für weiteres Wurzelwachstum vorhanden war. Entsprechend wiesen die Messdaten für Platanen im zweiten Versuchsjahr eine breitere Streuung bzgl. der verschiedenen Pflanz- und Bewässerungsvarianten auf, mit einer Streubreite von 4,8 mm für Platanen in gedämmten Pflanzgefäßen mit Trockenstress und 20,6 mm für Platanen im Boden mit Trockenstress. Die Platanen in Pflanzgefäßen reagierten auf die vollständige Durchwurzelung ihres Pflanzgefäßes mit reduziertem Wachstum ab dem Jahr 2022. Die Reduktion im Wachstum verstärkte sich im Jahr 2023 mit dem niedrigsten Zuwachs von 1,4 mm von Platanen in gedämmten Pflanzgefäßen mit Trockenstress und dem größten Zuwachs mit 5,1 mm für Platanen in gedämmten Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung. Es ist zu beachten, dass besonders Platanen in Pflanzgefäßen im Boden mit optimaler Bewässerung im dritten und vierten Versuchsjahr (2022 und 2023) zur Wurzelflucht aus dem Pflanzgefäß in das angrenzende Erdreich neigten und sich somit zusätzlichen Wurzelraum erschließen konnten. Dieser Umstand führt dazu, dass die Messergebnisse für 2022 und 2023 bei Platanen im Pflanzgefäß im Boden tendenziell zu hoch ausfallen und somit keine Reduktion im Wachstum wie bei den anderen Pflanzvarianten gemessen werden konnte. Platanen im Boden zeigten keinerlei Anzeichen für eine Reduktion im Wachstum. Der deutliche Unterschied in den Zuwachsraten von Platanen im Boden und Platanen im Pflanzgefäß zeigt den stark begrenzenden Effekt auf das Wachstum einer schnellwüchsigen Baumart durch begrenzten Wurzelraum auf.

Winterlinden wiesen im ersten Versuchsjahr 2020 nach der Pflanzung ein deutlich niedrigeres Wachstum als Platanen auf. Die Reaktion auf den Verpflanzungsstress fiel somit bei Winterlinden deutlich stärker aus als bei Platanen. Im zweiten Versuchsjahr 2021 waren die Zuwachsraten von Winterlinden und Platanen in Pflanzgefäßen auf einem ähnlichen Niveau.

Die Unterschiede in den Zuwachsraten bei Winterlinden fielen im Jahr 2021 in allen Pflanz- und Bewässerungsvarianten ähnlich aus, mit einer Streubreite von 7,9 mm für Winterlinden im Boden mit Trockenstress bis 10,6 mm für Winterlinden in gedämmten Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung. Erst im Versuchsjahr 2022 konnte eine signifikante Reduktion im Wachstum von Winterlinden in Pflanzgefäßen mit Trockenstress sowie in gedämmten Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung gemessen werden. Im Versuchsjahr zeigten alle Winterlinden in Pflanzgefäßen eine Reduktion im Wachstum. Winterlinden in nicht gedämmten Pflanzgefäßen mit Trockenstress wiesen den niedrigsten Zuwachs mit 2,3 mm und Winterlinden in Pflanzgefäßen im Boden mit optimaler Bewässerung mit 5,8 mm den höchsten Zuwachs auf. Auffällig ist, dass Winterlinden in gedämmten Pflanzgefäßen nur einen Unterschied von 0,2 mm im Zuwachs für beide Bewässerungsvarianten aufweisen. Bei den anderen Pflanzvarianten (inkl. Winterlinden im Boden) fällt dieser Unterschied deutlicher aus. Im Versuchsjahr 2023 ist auch zum ersten Mal ein signifikanter Unterschied in den Zuwachsraten zwischen Winterlinden im Boden und Winterlinden in Pflanzgefäßen zu verzeichnen. Diese Beobachtung legt nahe, dass Winterlinden im Boden im Vergleich zu Platanen im Boden eine deutlich längere Akklimatisierungsdauer an den neuen Standort haben bzw. stärker auf den Verpflanzungsschock reagiert haben. Des Weiteren ist deutlich aus den Daten zu erkennen, dass die langsam wachsende Baumart Winterlinde erst später das Pflanzgefäß durchwurzelt hat als die Platane und somit auch erst später mit einer Reduktion des Wachstums darauf reagiert. Diese Erkenntnis deutet an, dass für die langfristige Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen langsam wachsende Baumarten von Vorteil sein könnten.

Tabelle 5. Mittelwerte der Entwicklung des jährlichen Stammdurchmesserzuwachses in mm für Platane und Winterlinde in vier verschiedenen Pflanzungsvarianten und unter zwei Bewässerungsarten.

Baumart	Pflanzgefäß	Bewässerung	2020	2021	2022	2023	Gesamt
Platane	G	optimal	7.3	19.6	21.1	24.4	72.3
		trocken	8.1	20.6	18.9	23.9	71.5
	PG	optimal	3.8	9.2	10.0	9.7	32.7
		trocken	3.7	7.9	6.6	4.3	22.4
	P	optimal	3.9	6.7	5.8	3.9	20.4
		trocken	4.2	5.9	2.9	1.8	14.8
	PI	optimal	4.4	6.9	5.7	5.1	22.1
		trocken	4.6	4.8	3.5	1.4	14.3
Linde	G	optimal	1.8	8.3	10.2	13.3	33.5
		trocken	1.1	7.9	8.3	11.0	28.3
	PG	optimal	1.6	8.7	8.7	5.8	24.7
		trocken	2.5	10.1	6.6	3.0	22.3
	P	optimal	3.6	9.9	8.8	5.1	27.4
		trocken	3.2	8.6	5.0	2.3	19.1
	PI	optimal	3.8	10.6	6.9	3.0	24.3
		trocken	3.1	9.4	4.8	2.8	20.1

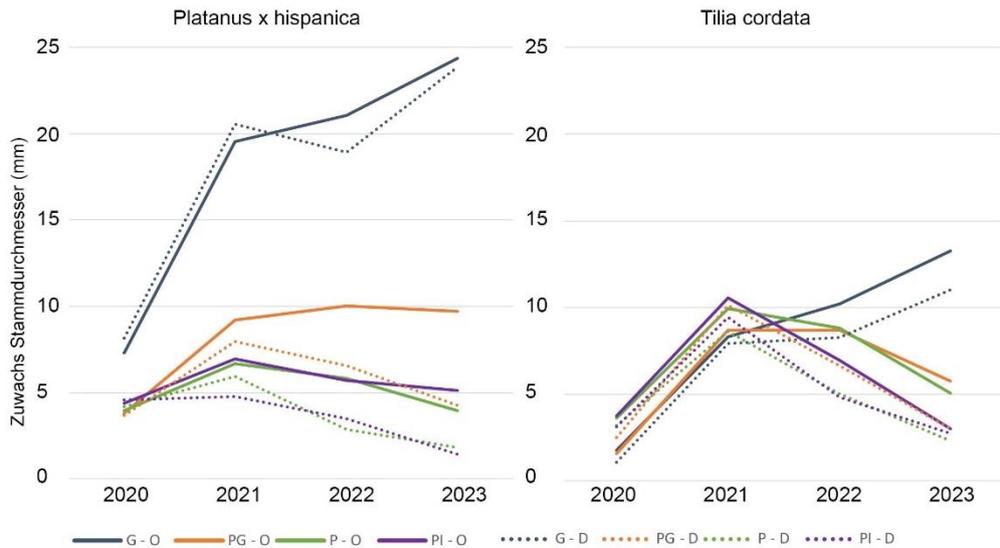


Abbildung 41. Verlauf des jährlichen Stammdurchmesserzuwachses der Versuchsjahre 2020 - 2023 für links: *P. hispanica* und rechts: *T. cordata* sowie die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Die Bewässerungsvarianten sind mit durchgezogener Linie für optimal (O) und gestrichelter Linie für Trockenstress (D) dargestellt.

Die Messungen zum Stammdurchmesser auf Brusthöhe zeigen auf, dass die Begrenzung des Wurzelraums einen deutlichen stärkeren Einfluss auf das Wachstum hat als das Bewässerungsregime. Diese Erkenntnis deckt sich mit bisherigen Forschungsergebnissen zu begrenzten Wurzelraum. So nennen Hsu et al. [19] die Begrenzung des Wurzelraums als effektivste Maßnahme um das Triebwachstum zu reduzieren. Ist der Wurzelraum hingegen für die Baumgröße ausreichend dimensioniert, führt ein größeres Volumen nicht zu einem größeren Wachstum [19,32,64,106]. Dies kann in Ansätzen auch in den ersten beiden Versuchsjahren (2020 und 2021) anhand der Wachstumsdaten der Winterlinden nachvollzogen werden.

Das Bewässerungsregime hat jedoch einen signifikanten Einfluss auf die Wachstumsdynamik innerhalb einer Pflanzvariante. Unsere Versuchsergebnisse zeigen auf, dass optimale Bewässerung bis zu einem gewissen Grad die Begrenzung des Wurzelraums kompensieren kann. Diese Erkenntnisse decken sich mit Erkenntnissen anderer Versuche mit Bäumen in Pflanzgefäßen. So kommt DeGaetano [27] zu dem Ergebnis, dass das Bewässerungsregime maßgeblichen Einfluss auf das notwendige Wurzelraumvolumen in Korrelation zu einer bestimmten Kronenprojektionsfläche hat.

Untersuchungen über einen längeren Versuchszeitraum sind jedoch nötig, um ermitteln zu können, wann das Wachstum zum Erliegen kommt und wann die Vitalität des Baumes abnimmt.

4.2.3 Kronenprojektionsfläche

Unter optimaler Bewässerung erzielten Platanen die größten Kronenschirmflächen. Die höchste durchschnittliche Kronenausdehnung von 4,4 m² wurden bei Platanen im Boden (G) gemessen, gefolgt von Platanen in Pflanzgefäßen im Boden (PG) und von isolierten Pflanzgefäßen (PI) mit 3,5 m² sowie anschließend nicht isolierten Pflanzgefäßen (2,9 m²). Bei Platanen in Pflanzgefäßen im Boden (PG) unter reduzierter Bewässerung wurde eine um 36% verringerte Schirmfläche festgestellt. Platanen in nicht isolierten Pflanzgefäßen (P) und isolierten Pflanzgefäßen (PI) wiesen unter reduzierter Bewässerung eine Reduktion der Schirmfläche von etwa 34% bzw. 42% auf (Abbildung 42 und Tabelle 6).

Für Winterlinden zeigte sich, dass die Bewässerung keinen signifikanten Einfluss auf die Kronenschirmfläche hatte. Winterlinden im Boden wiesen die größte Kronenschirmfläche auf. Jedoch ist der Unterschied zwischen Bodenpflanzung und Pflanzgefäß nicht so signifikant wie bei Platanen. Die Winterlinden entwickelten im Durchschnitt eine Kronenschirmfläche von 2,2 m² in nicht isolierten Pflanzgefäßen in beiden Bewässerungsvarianten und bis zu 2,9 m² im Pflanzgefäß im Boden und isolierten Pflanzgefäßen. Interessanterweise zeigten Winterlinden unter reduzierter Bewässerung sogar eine im Durchschnitt um 8-20% höhere Kronenschirmfläche im Vergleich zu optimalen Bewässerungsbedingungen (Abbildung 42, Tabelle 6). Zudem bildete die Winterlinde unter reduzierter Bodenbewässerung eine weitere Krone in den oberirdischen Pflanzgefäßvarianten aus, die um 13-30% größer war als die der Platane in nicht isolierten und isolierten Pflanzgefäßen.

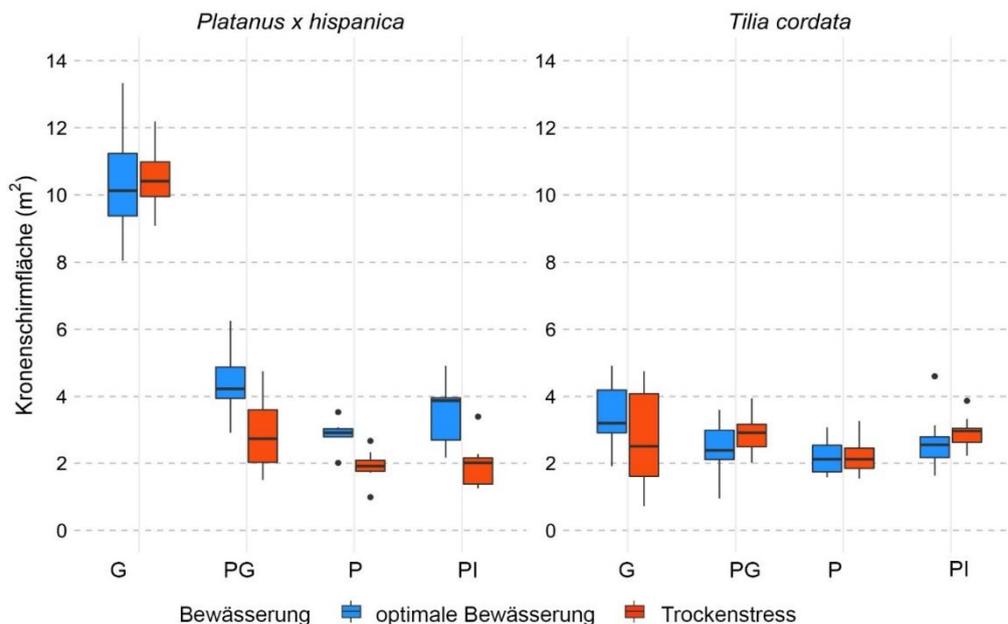


Abbildung 42. Kronenschirmfläche von Platane (links) und Winterlinde (rechts) im Versuchsjahr 2023 für die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI). Die Bewässerungsvarianten sind mit blau für optimale und rot für Trockenstress dargestellt.

Tabelle 6. Kronenschirmfläche (Schattenfläche in m²) im Versuchsjahr 2023 bei Platanen und Winterlinden für die Pflanzvarianten im Boden (G), Pflanzgefäß im Boden (PG), nicht isoliertes Pflanzgefäß (P) und isoliertes Pflanzgefäß (PI) und Bewässerungsarten optimal und trocken. Dargestellt sind Mittelwerte (MW), Standardabweichungen (SD), Minima (Min) und Maxima (Max).

Baumart	Pflanzgefäß	Bewässerung	MW	Min	Max	SD
Platane	G	optimal	10.4	8	13.3	1.7
		trocken	10.5	9.1	12.2	1
	PG	optimal	4.4	2.9	6.2	1
		trocken	2.8	1.5	4.8	1.1
	P	optimal	2.9	2	3.5	0.4
		trocken	1.9	1	2.7	0.5
	PI	optimal	3.5	2.2	4.9	1
		trocken	2	1.2	3.4	0.7
Winterlinde	G	optimal	3.5	1.9	4.9	1
		trocken	2.7	0.7	4.8	1.5
	PG	optimal	2.4	0.9	3.6	0.9
		trocken	2.9	2	3.9	0.9
	P	optimal	2.2	1.6	3.1	0.5
		trocken	2.2	1.5	3.3	0.5
	PI	optimal	2.7	1.6	4.6	0.9
		trocken	2.9	2.2	3.9	0.5

Die Messergebnisse zur Kronenprojektionsfläche zeigen bei Winterlinden in Pflanzgefäßen teilweise konträre Ergebnisse im Vergleich zum ermittelten Stammdurchmesser. So weisen Linden im Pflanzgefäß im Boden und im gedämmten Pflanzgefäß mit Trockenstress eine höhere Kronenprojektionsfläche auf als mit optimaler Bewässerung, während die Messungen zum Stammdurchmesser jeweils einen geringeren Stammdurchmesser für beide Varianten mit Trockenstress als mit optimaler Bewässerung angeben.

4.2.4 Blattanzahl

Im Versuchsjahr 2021 (Abbildung 43) wurde wie bereits erwähnt die Bewässerung unterteilt in optimale Bewässerung und Trockenstress. Trotz dieser unterschiedlichen Bewässerungsvarianten konnten bei Platanen und Winterlinden in Pflanzgefäßen nur geringfügige Differenzen in der Blattanzahl bei beiden Bewässerungsvarianten festgestellt werden. Das gleiche gilt in Bezug auf die unterschiedlichen Baumarten. Bei Bäumen im Boden gab es einen deutlichen Unterschied in der Blattanzahl. So hatten Platanen im Boden deutlich mehr Blätter als Winterlinden. Aber auch hier ist kein signifikanter Unterschied in der Blattanzahl bei beiden Baumarten in Bezug auf die Bewässerung festzustellen. Es fällt jedoch auf, dass Winterlinden in allen Pflanzvarianten signifikant früher die Blätter abwirft als Platane. Zudem warfen Bäume in oberirdischen Pflanzgefäßen früher das Laub ab als Bäume im Boden bzw. in Pflanzgefäßen im Boden. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass Bäume in Pflanzgefäßen mit Trockenstress tendenziell früher das Laub abwerfen. Dieses Muster war auch im darauffolgenden Jahr zu beobachten.

In der dritten Vegetationsperiode nahm die Blattzahl im Vergleich zur zweiten Vegetationsperiode signifikant zu. Die Zunahme reichte von +50 % (Platane im Pflanzgefäß) bis zu +200 % (Winterlinde im Boden) (Abbildung 43). Die Messungen zeigen, dass bei beiden Baumarten in allen Pflanzvarianten mit zunehmender Dauer der reduzierten Bewässerung die Blattanzahl im Vergleich zur optimalen Bewässerung abnahm. Bei Winterlinden war die Abnahme der Blattzahl im Trockenstress deutlich stärker ausgeprägt als bei Platanen.

In der vierten Vegetationsperiode 2023 nahm die Blattzahl im Vergleich zur dritten Vegetationsperiode 2022 für Bäume im Boden signifikant zu. Eine signifikante Zunahme der Blattzahl wurde bei Bäumen in Pflanzgefäßen bei Winterlinden und optimal bewässerten Platanen ermittelt (Abbildung 43). Die Messungen zeigen, dass bei beiden Baumarten in Pflanzgefäßen mit zunehmender Dauer der reduzierten Bewässerung die Blattanzahl im Vergleich zur optimalen Bewässerung abnahm, mit Ausnahme von Winterlinden in gedämmten Pflanzgefäßen mit Trockenstress. Bei Platanen war die Abnahme der Blattzahl im Trockenstress deutlich stärker ausgeprägt als bei Winterlinden. Bei Bäumen im Boden wiesen Platanen mit optimaler Bewässerung ab dem vierten Versuchsjahr mit Abstand die höchste Blattanzahl auf.

Wie schon während der zweiten Vegetationsperiode weisen auch in den darauffolgenden Vegetationsperioden Bäume in oberirdischen Pflanzgefäßen einen stärkeren Laubabwurf auf als Bäume im Boden. Dies kann auf die stärkere Temperatureinwirkung auf den Wurzelbereich zurückgeführt werden, da die Substrattemperatur im Wurzelbereich einen großen Effekt auf den Beginn des Blattaustriebs und den Blattabwurf hat [32,40,42,83]. Die ausgeprägte Abnahme der Blattanzahl bei Winterlinden mit Trockenstress in Pflanzgefäßen während der zweiten Hälfte (ab Juli 2022) der Vegetationsperiode 2022 deutet darauf hin, dass die Kombination von Hitze- und Trockenstress besonders im Juli 2022 zu einer starken Reaktion in Form von Blattabwurf bei den betroffenen Bäumen führte, um die Balance zwischen Wasserverfügbarkeit und Wasserverbrauch wiederherzustellen. Eine höhere Lufttemperatur führt zu einer stärkeren Verdunstung des Baumes, um die Blattemperatur zu kühlen und führt unweigerlich zu einem höheren Wasserbedarf, um den Wasserverlust zu kompensieren [11,35]. Im Gegensatz zu Winterlinden sind Platanen in der Lage ihren Wasserverbrauch bei Trockenstress zu reduzieren, um den Wasserverlust zu minimieren [105]. Unsere Beobachtungen zeigen, dass Platanen dazu auch unter heißen Bedingungen noch in der Lage sind. Diese Fähigkeit ist maßgeblich für den deutlichen Unterschied von Blattverlust zwischen Winterlinde und Platane im genannten Zeitraum und beschriebenen Bedingungen.

Während Winterlinden in Pflanzgefäßen im Versuchsjahr 2023 noch eine Zunahme der Blattanzahl unabhängig der Bewässerung aufwiesen, konnte dies bei Platanen in Pflanzgefäßen nur mit optimaler Bewässerung festgestellt werden. Diese Unterschiede in der Blattanzahl für Winterlinde und Platane in Pflanzgefäßen spiegelt die Messergebnisse zum Stammdurchmesser wider. Dort konnte ein ähnlicher Unterschied in der Zuwachsrates gemessen werden. Die Blattzählung deutet daraufhin, dass Platanen im Pflanzgefäß ihre Wachstumsgrenze in der vierten Vegetationsperiode nahezu erreicht haben und die langsamer wachsende Winterlinde die Wachstumsgrenze vermutlich erst im darauffolgenden Jahr erreichen wird.

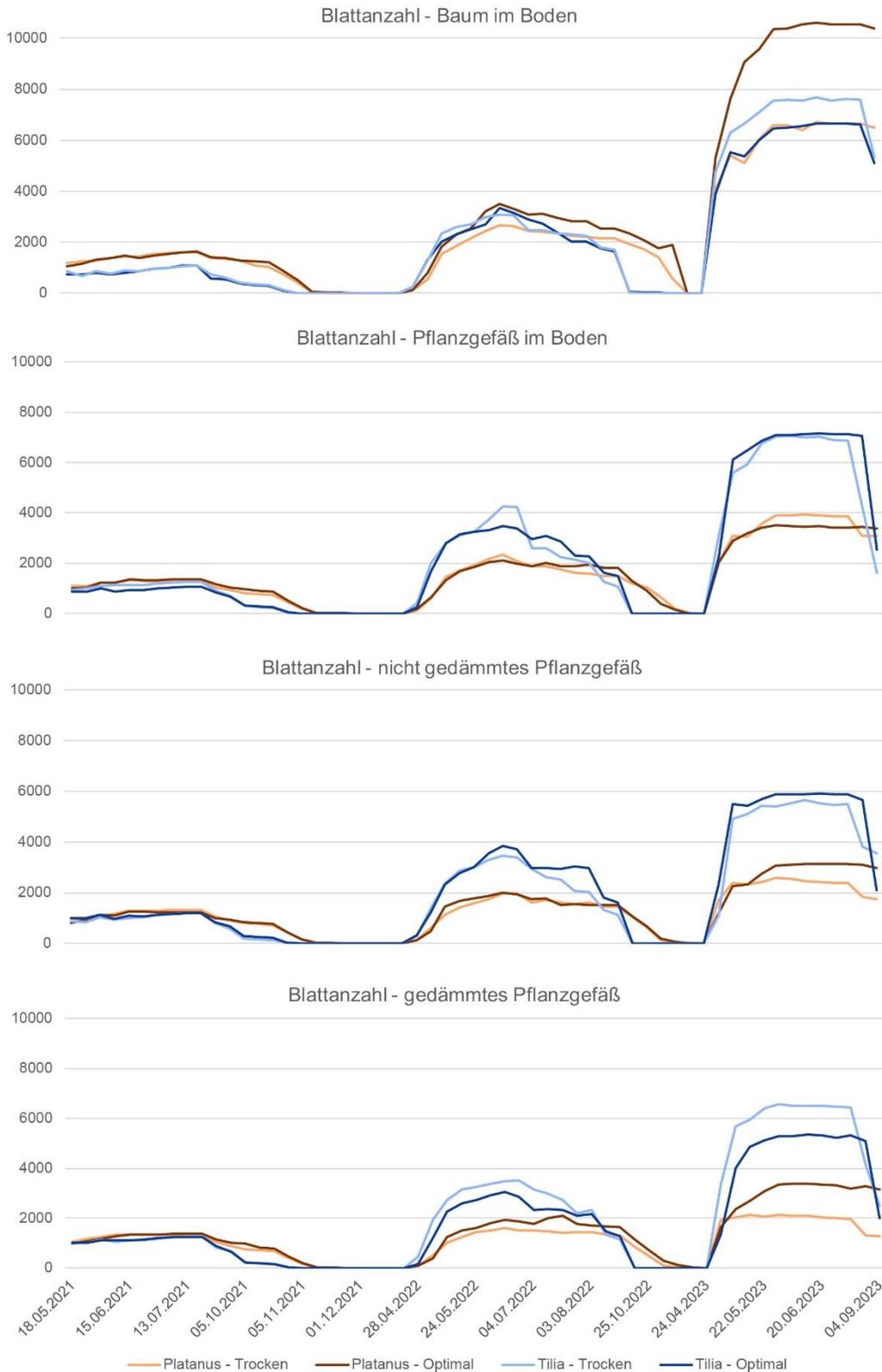


Abbildung 43. Entwicklung der Blattanzahl über die Versuchsjahre 2021 bis 2023 im Boden, in Pflanzgefäßen im Boden, in nicht gedämmten und in gedämmten Pflanzgefäßen (von oben nach unten). Bei *T. cordata* sind Bäume mit Trockenstress hellblau und Bäume mit optimaler Bewässerung dunkelblau dargestellt. Bei *P. x hispanica* sind Bäume mit Trockenstress hellrot und Bäume mit optimaler Bewässerung dunkelrot dargestellt.

4.2.5 Blattmorphologie

Hinsichtlich der Blattmorphologie hatten beide Baumarten bei reduzierter Bewässerung eine um 11 % geringere Blattgröße. Abbildung 44 gibt einen Überblick über die Blattgröße für die ausgewählten Baumarten, Pflanzvarianten und Bewässerungsart. Betrachtet man bei den Platanen nur die Varianten in Pflanzgefäßen (PG, P, PI), ist sogar eine um 20 % niedrigere Blattgröße unter Trockenstress festzustellen. Es ist bekannt, dass die Verringerung der Blattfläche eine weitere typische Reaktion von Bäumen auf Trockenstress ist, um die Verdunstungsrate und somit den Wasserbedarf zu reduzieren [107,108]. Die beschriebenen Beobachtungen zu Blattanzahl und Blattmorphologie verdeutlichen die Wichtigkeit einer ausreichenden und verlässlichen Bewässerung von Bäumen in Pflanzgefäßen, um deren Überleben zu sichern und deren Ökosystemleistung zu fördern.

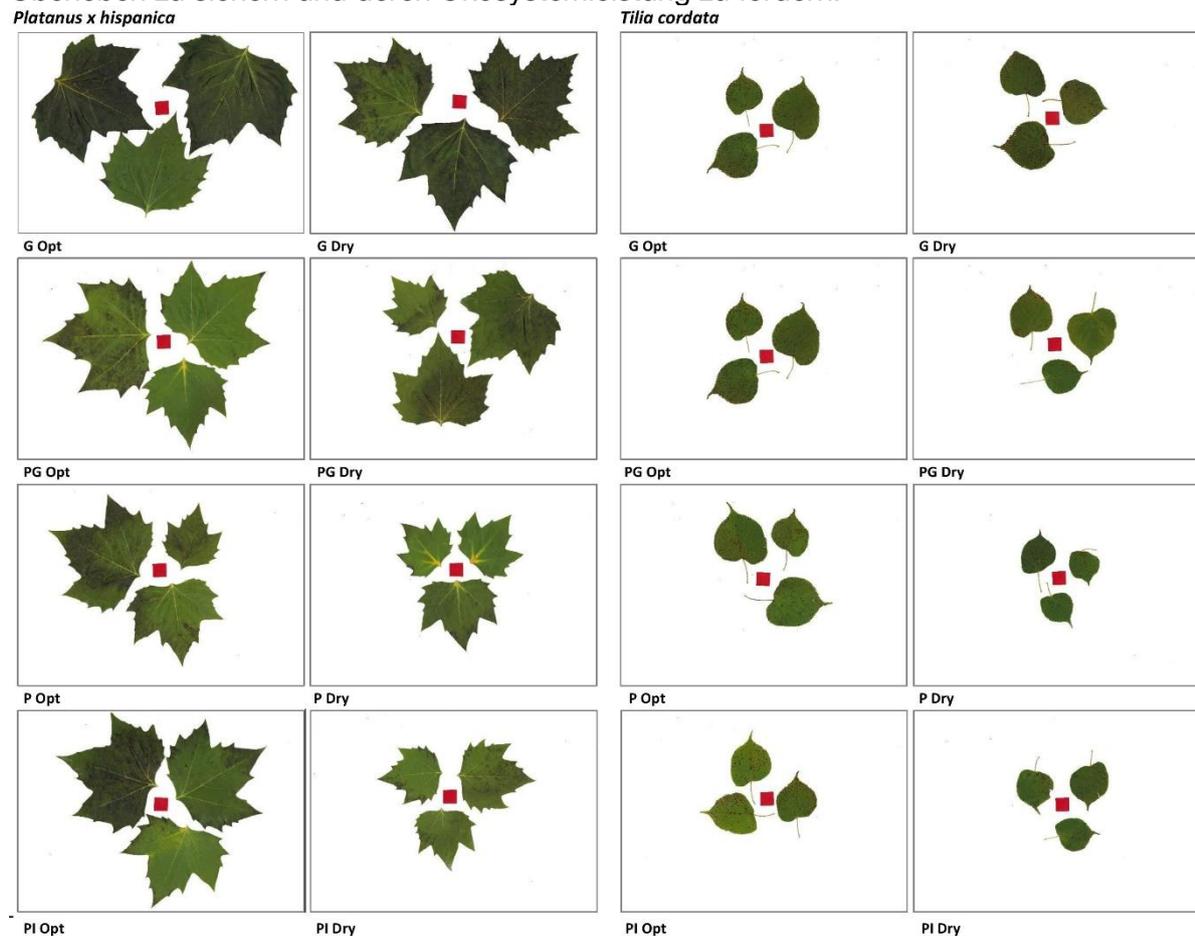


Abbildung 44. Blattgröße der Baumarten *P. x hispanica* und *T. cordata* der Versuchsreihe 1 im Vegetationsjahr 2022.

4.2.6 Blattfläche

In Abbildung 45 ist die mittlere Blattfläche [cm²] der zwei Baumarten für das Jahr 2023 dargestellt (Aufnahme: Ende Juni 2023). Innerhalb der Baumarten gab es signifikante Unterschiede in der mittleren Blattflächengröße ($p < 0,05$). Platanen im Boden mit optimaler Bewässerung besaßen die größte Blattfläche. Winterlinden in gedämmten Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung wiesen die kleinste Blattfläche auf. Während bei Winterlinden nur geringe Differenzen in der Blattfläche in Bezug zur Bewässerung gemessen wurden, waren diese bei Platanen deutlich ausgeprägt. Winterlinden mit optimaler Bewässerung wiesen im Boden und im gedämmten Pflanzgefäß eine geringere und im Pflanzgefäß im Boden eine

höhere Blattfläche auf als mit Trockenstress. Winterlinden in nicht gedämmten Pflanzgefäßen hatten eine gleichgroße Blattfläche für beide Bewässerungsarten. Bei Platanen in Pflanzgefäßen konnte eine signifikante Differenz in der Blattfläche zwischen optimaler Bewässerung und Trockenstress gemessen werden. Diese Beobachtung deckt sich für die oberirdischen Pflanzgefäße mit den Ergebnissen zur Blattzählung. Die Ergebnisse zur Blattfläche und zur Blattanzahl zeigen auf, dass Bäume in Trockenstress tendenziell nicht nur eine geringere Anzahl an Blättern ausbilden, sondern gleichzeitig auch kleinere Blätter. Dies sind Anpassungsmaßnahmen des Baumes an das Wasserangebot, um die Balance zwischen Wasseraufnahme und Verdunstung zu halten. Die Messergebnisse zur Blattfläche als auch zur Blattanzahl und Kronenprojektionsfläche für Winterlinden gedämmten Pflanzgefäßen mit Trockenstress sind konträr zu den Messergebnissen zum Stammdurchmesser. So ist der Stammdurchmesser (vgl. Kapitel 4.2.2) für Winterlinden in gedämmten Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung größer als für Winterlinden mit Trockenstress. Diese Tendenz spiegelt sich jedoch nicht in Messparametern zur Baumkrone wider. Während Winterlinden im Pflanzgefäß im Boden mit Trockenstress eine größere Kronenprojektionsfläche aufweisen als Winterlinden mit optimaler Bewässerung, ist die mittlere Blattfläche deutlich kleiner und die Blattanzahl fällt etwas geringer aus. Die ganzheitliche Betrachtung dieser Parameter liefert eine plausible Erklärung, warum der Stammdurchmesser bei Winterlinden im Pflanzgefäß im Boden mit optimaler Bewässerung größer ist als bei Winterlinden mit Trockenstress. Umso bemerkenswerter ist, dass dies bei Winterlinden in gedämmten Pflanzgefäßen nicht der Fall ist. Eine plausible Erklärung zu diesem Phänomen kann ggf. erst gegeben werden, wenn der Versuch noch weitere Jahre fortgeführt wird.

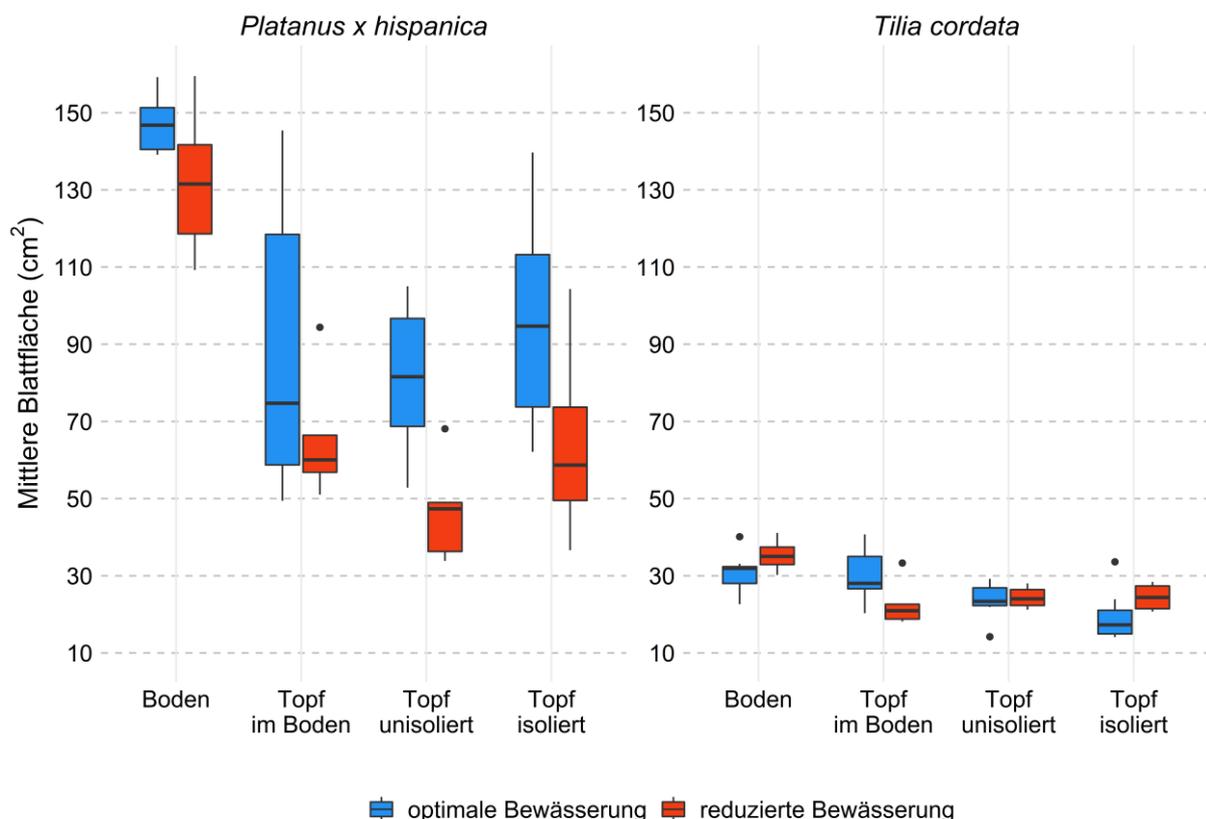


Abbildung 45. Mittlere Blattfläche in cm² der Baumarten *P. x hispanica* und *T. cordata* der Versuchsreihe 1 im Vegetationsjahr 2023.

4.2.7 Biomasseentwicklung

Wie im Methodenteil beschrieben, wurden die Bäume, einschließlich ihrer Äste und Wurzelbereiche, am Tag der Pflanzung im März 2020 einem standardisierten Rückschnitt unterzogen und anschließend gewogen. Platanen wiesen zu diesem Zeitpunkt durchschnittlich ein Gewicht von $3,7 \pm 0,7$ kg auf, während Winterlinden ein Mittelgewicht von $2,7 \pm 0,3$ kg hatten.

Biomassezuwachs

Platanen im Boden wiesen mit einem Biomassezuwachs von 98,3 kg (optimale Bewässerung) bzw. 87 kg (Trockenstress) mit großem Abstand den größten Zuwachs. Winterlinden im Boden hatten einen Zuwachs von 17,2 kg (optimale Bewässerung) bzw. 18 kg (Trockenstress). Während die Bewässerungsart bei Platanen im Boden eine Auswirkung auf den Biomassezuwachs zeigte, war dies bei Winterlinden nicht signifikant (Abbildung 46 und Tabelle 7).

Platanen im Pflanzgefäß im Boden (PG) zeigten unter optimaler Bewässerung den höchsten Biomassenzuwachs (25 kg) von Bäumen in Pflanzgefäßen. Platanen im gleichen Pflanzgefäßen unter reduzierter Bewässerung wogen dagegen nur (10,5 kg). Platanen in Pflanzgefäßen im Boden sind aufgrund der genannten Wurzelflucht ins angrenzende Erdreich nur bedingt aussagekräftig bzgl. des Biomassezuwachses. Platanen in den Pflanzgefäßvarianten P und PI mit optimaler Bewässerung wiesen ein vergleichbares Gewicht von etwa 12 kg auf, während sie unter reduzierter Bewässerung etwa 4 kg weniger Biomasse hatten.

Winterlinden zeigten unter optimaler Bewässerung in allen drei Pflanzgefäßen einen ähnlichen Biomassenzuwachs von etwa 13 kg. Im Gegensatz dazu wies die Winterlinde unter reduzierter Bewässerung im Pflanzgefäß im Boden den geringsten Biomassenzuwachs von nur 5,2 kg auf. Winterlinden in den Pflanzgefäßvarianten P und PI wogen im Durchschnitt hingegen 9,9 kg bzw. 9,2 kg.

Besonders interessant ist die Reaktion der Bäume, die im Pflanzgefäß im Boden (PG) gepflanzt wurden, wenn sie einer reduzierten Bewässerung ausgesetzt waren. Beide Baumarten hatten einen deutlich reduzierten Biomassenzuwachs, während unter optimalen Bewässerungsbedingungen dieser Zuwachs etwas mehr als doppelt so groß war. Diese Ergebnisse unterstreichen eindrücklich die bedeutende Rolle der Bewässerung in Bezug auf das Wachstum von Bäumen in Pflanzgefäßen. Zudem verdeutlichen sie die differenzierten Reaktionen von Platanen und Winterlinden auf unterschiedliche Umweltbedingungen.

Platanen im Boden (G) wiesen mit großem Abstand die meiste Biomasse auf. Dies war auch anhand der Dokumentation der Stammdurchmesser in Versuchsreihe 1 zu erwarten. Bei Winterlinden im Boden war der weniger stark ausgeprägt gegenüber Winterlinden in Pflanzgefäßen. Bei beiden Baumarten ist jedoch eindeutig zu erkennen, dass die Begrenzung des Wurzelraums in einem Pflanzgefäß der maßgebende Faktor für die Wuchsgeschwindigkeit und Baumgröße ist.

Tabelle 7. Ermittelte Messwerte der Biomasse in kg ausgewählter Bäume der Versuchsreihe 1

Baumart	Pflanzgefäß	Bewässerung	Biomasse Frischgewicht	Frischgewicht initial 2020	Biomassen- zuwachs
latanus x hispanica	G	optimal	101.9	3.7	98.3
	G	trocken	91.3	4.3	87.0
	PG	optimal	28.3	3.2	25.1
	PG	trocken	14.9	4.4	10.5
	PG	optimal	17.2	4.0	13.2
	PG	trocken	11.7	3.2	8.4
	PI	optimal	14.7	3.1	11.6
	PI	trocken	11.7	3.3	8.4
Tilia cordata	G	optimal	20.1	2.9	17.2
	G	trocken	20.8	2.8	18.0
	PG	optimal	15.7	2.5	13.2
	PG	trocken	11,2	2.4	8,8
	PG	optimal	16.5	2.9	13.6
	PG	trocken	12.0	2.1	9.9
	PI	optimal	14.6	2.5	12.1
	PI	trocken	12.0	2.7	9.2

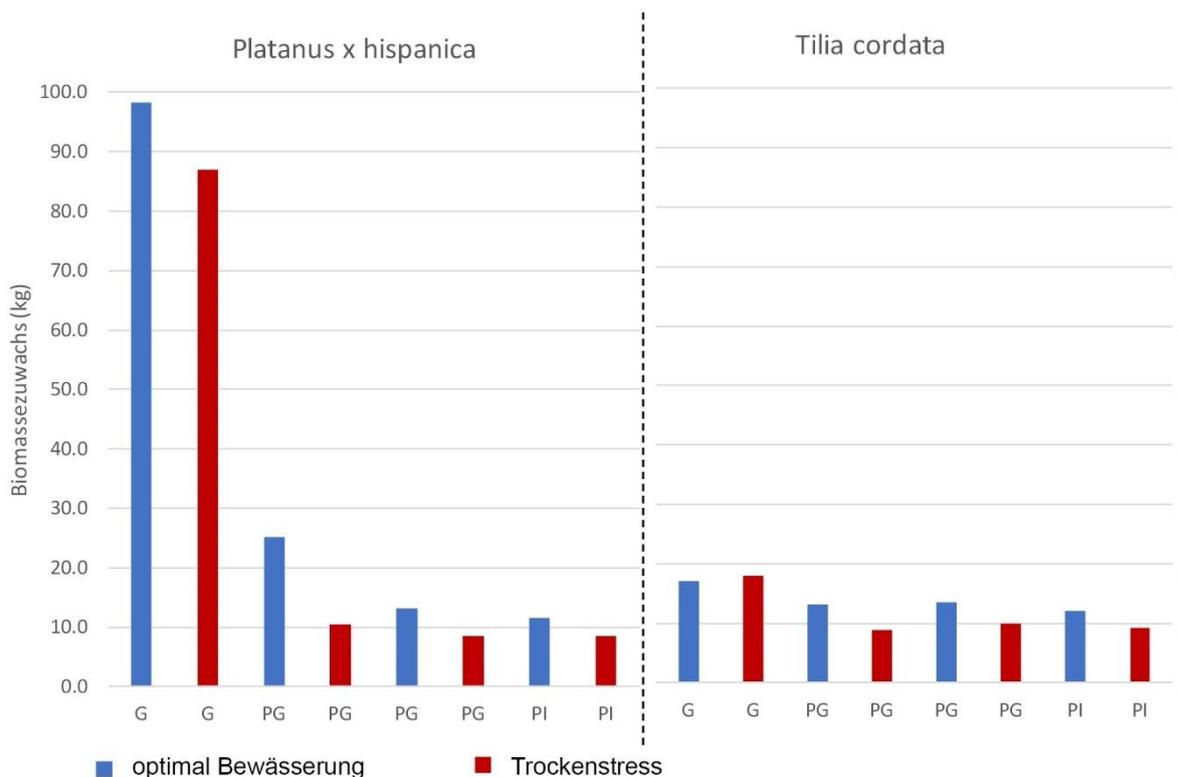


Abbildung 46. Zuwachs an holziger Biomasse (Äste, Stamm und Wurzeln) bei Bäumen (Platane und Winterlinde) in verschiedenen Pflanzvarianten. Diese wurde im Frischgewicht in Kilogramm vor der Pflanzung im Jahr 2020 gemessen und nach der Ernte im Jahr 2023 erneut erfasst.

Trockenbiomasse

Die Gesamttrockenmasse der holzigen Biomasse der Bäume (Stamm, Äste, Wurzeln), die nach der Ernte im Jahr 2023 erfasst wurde, ist in Abbildung 47 dargestellt. Platanen im Boden zeigen im Vergleich zum Biomassezuwachs, bei dem das Frischgewicht als Bemessungsgrundlage diente, beim Trockengewicht deutlich geringere Gewichtsunterschiede bezogen auf die Bewässerungsvariante. Bei Winterlinden ist dieser Unterschied in den Messwerten von Biomassezuwachs und Trockengewicht nicht festzustellen. Platanen im Pflanzgefäß im Boden (PG) und nicht isolierten Pflanzgefäß (P) wiesen unter optimaler Bewässerung eine doppelt so hohe Biomasse auf wie unter reduzierter Bewässerung in denselben Pflanzgefäßen. Im isolierten Pflanzgefäßen (PI) hatte die Bewässerung wenig Einfluss, und die Werte lagen hier bei 6-7 kg für beide Bewässerungsvarianten.

Auch bei der Winterlinde spielte die Bewässerung in allen drei Pflanzgefäßvarianten eine Rolle. Im nicht isolierten Pflanzgefäß war die Biomasse sogar fast halb so groß unter optimaler Bewässerung (9,2 kg) im Vergleich zu reduzierter Bewässerung (5,9 kg). Winterlinden im isolierten Pflanzgefäß (PI) hatten unter optimaler Bewässerung (7,2 kg) lediglich 1 kg weniger Biomasse als unter reduzierter Bewässerung (6,2 kg).

Die Trockengewichtsanalyse der holzigen Biomasse nach der Ernte lieferte zusätzliche Einblicke. Bei Platanen im Pflanzgefäß im Boden (PG) und nicht isolierten Topf (Pflanzgefäßen) war die Bewässerung entscheidend für die erzielte Biomasse, während sie im isolierten Pflanzgefäß (PI) einen geringen Einfluss hatte. Ähnliche Effekte wurden auch bei Winterlinden im nicht isolierten Pflanzgefäß beobachtet.

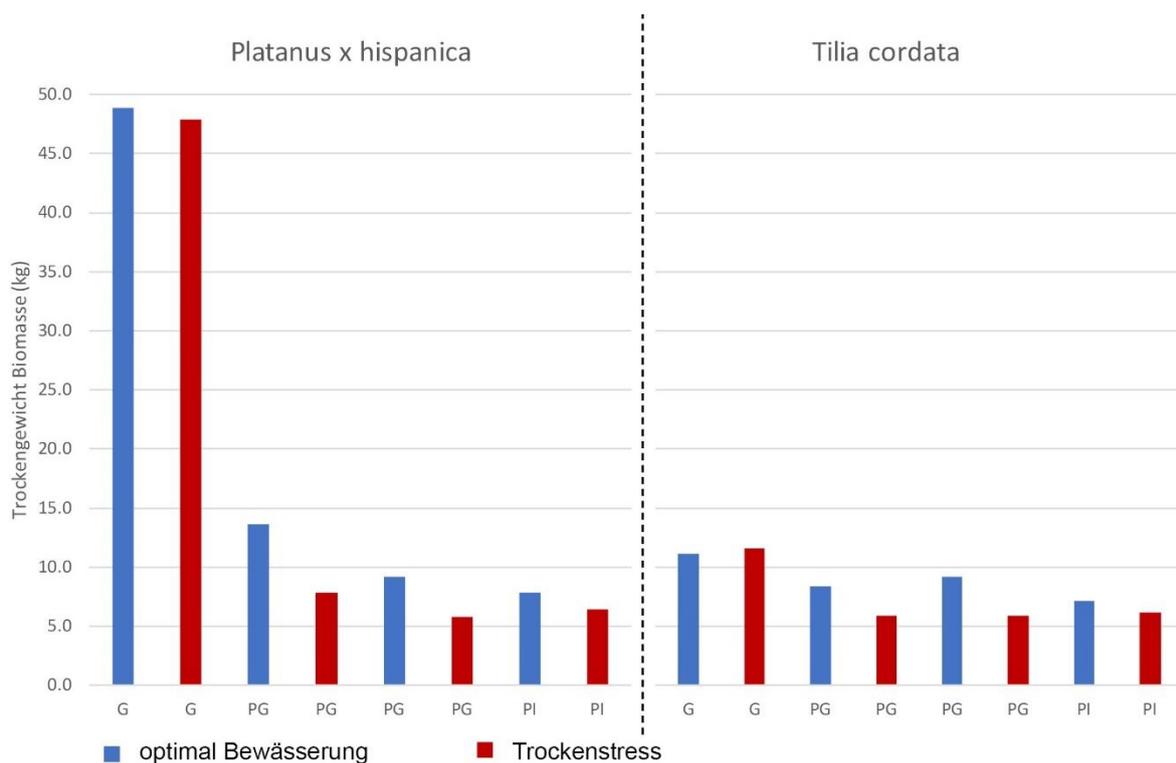


Abbildung 47. Darstellung der Gesamttrockenmasse der holzigen Biomasse der Bäume nach der Ernte im Herbst 2023, gemessen in Kilogramm (kg). Links für *P. hispanica* und rechts für *T. cordata*.

Bestimmung Feinwurzel- und Strukturwurzelanteil

Die Wurzeln wurden je nach Durchmesser in Grobwurzeln (>2 mm) und Feinwurzeln (<2 mm) unterteilt und anschließend getrocknet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 48 dargestellt.

In unserem Versuch wurde beobachtet, dass der Anteil an Grobwurzeln bei beiden Baumarten unter optimalen Bewässerungsbedingungen signifikant höher war als unter reduzierter Bewässerung (Abbildung 48). Besonders hervorzuheben ist, dass Platanen im Pflanzgefäß im Boden den höchsten Gewichtsanteil an Grobwurzeln aufwiesen, der etwa 50% höher lag als in den gedämmten und nicht gedämmten Pflanzgefäßen. Bei Winterlinden wurde der höchste Gewichtsanteil an Grobwurzeln im nicht gedämmten Pflanzgefäß festgestellt (3,8 kg), gefolgt vom gedämmten Pflanzgefäß (3 kg) und dem geringsten Wert im Pflanzgefäß im Boden (2 kg). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Biomasseanteil von Grobwurzeln bei Bäumen in Pflanzgefäßen stark von den Bewässerungsbedingungen und der Art des Pflanzgefäßes beeinflusst wird. Unter optimalen Bewässerungsbedingungen neigten sowohl Platanen als auch Winterlinden dazu, einen höheren Gewichtsanteil an Grobwurzeln zu entwickeln. Insbesondere zeigte sich der Einfluss des Pflanzgefäßes, insbesondere des Pflanzgefäßes im Boden, bei Platanen als signifikant, während Winterlinden im nicht gedämmten Pflanzgefäß die höchste Ausprägung aufwiesen. In unserem vierjährigen Versuch wiesen die Platanen unter optimalen Bewässerungsbedingungen höhere Anteile an Feinwurzeln auf als unter reduzierter Bewässerung. Dies deutet darauf hin, dass eine angemessene Bewässerung die Entwicklung und das Wachstum der Feinwurzeln bei Platanen begünstigt. Insbesondere zeigte die Platane im nicht isolierten Pflanzgefäßen den höchsten Anteil an Feinwurzeln (2 kg), was etwa 50% mehr war als in Pflanzgefäßen im Boden und gedämmten Pflanzgefäßen. Der geringste Anteil an Feinwurzeln wurde bei Platanen im Pflanzgefäß im Boden unter reduzierter Bewässerung festgestellt, nämlich nur 0,3 kg. Bei Winterlinden deutete die Bewässerung eher darauf hin, dass der Anteil an Feinwurzeln unter reduzierter Bewässerung, mit Ausnahme von Pflanzgefäßen im Boden, in nicht gedämmten und gedämmten Pflanzgefäßen um 25-50% höher war.

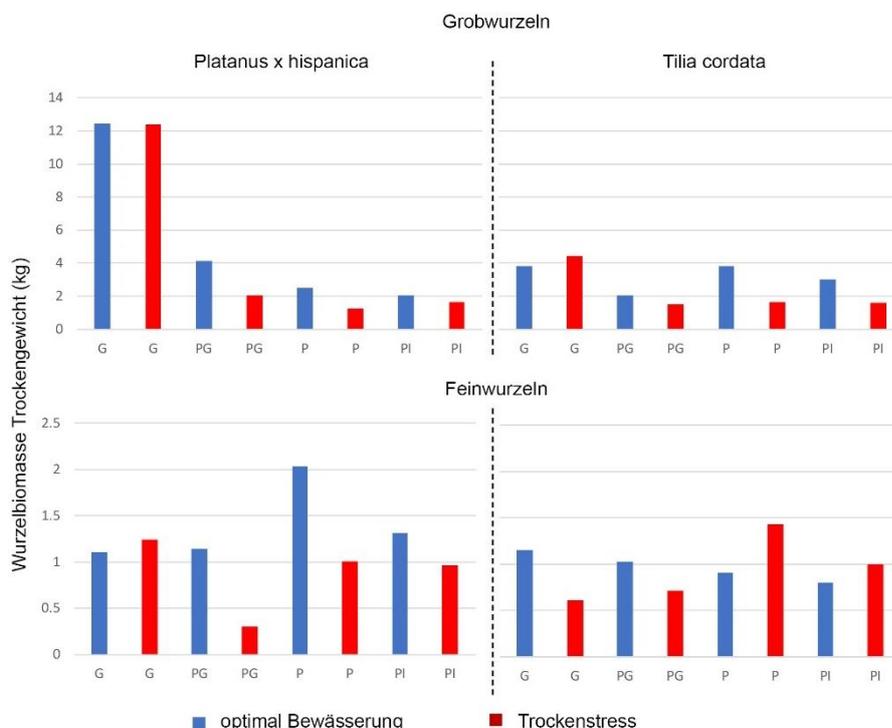


Abbildung 48. Trockengewicht in kg der Wurzelbiomasse von *P. hispanica* links und *T. cordata* rechts unterteilt in Grob- (oben) und Feinwurzeln (unten).

Die Grobwurzeln bei Bäumen bilden das strukturelle Wurzelsystem, das dem Baum Halt gibt und ihn im Boden verankert. Darüber hinaus dienen sie dem Wasser- und Nährstofftransport aus den Feinwurzeln in die Baumkrone. Aufgrund dieser Funktionen tragen sie maßgeblich zum Wachstum und zur Gesundheit der Bäume bei [109].

Die Feinwurzeln spielen eine entscheidende Rolle für die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen bei Bäumen. Mit zunehmendem Alter der Bäume verholzen ihre Wurzeln und dienen hauptsächlich dem Transport, können jedoch keine Ionen mehr eigenständig aufnehmen. Daher ist ein gut entwickeltes System von Feinwurzeln für ein gesundes Pflanzenwachstum unerlässlich. Schäden an den Feinwurzeln, beispielsweise durch Staunässe oder Überdüngung, können zu ernsthaften Versorgungsengpässen für die Pflanze führen (Jackson et al., 1996).

Gesamte Wurzelmasse

Unter optimalen Bewässerungsbedingungen zeigte die Platane den bemerkenswert höchsten Wurzelanteil im Pflanzgefäß im Boden (5,27 kg), gefolgt vom nicht gedämmten (4,53 kg) und gedämmten Pflanzgefäß (3,38 kg) (Abbildung 49). Zudem wurde unter reduzierter Bewässerung ein signifikanter Rückgang der Wurzelmasse beobachtet. Insbesondere war der Rückgang im Pflanzgefäß im Boden mit 55%, im nicht gedämmten Pflanzgefäß mit 50% und im gedämmten Pflanzgefäß mit 22% im Vergleich zur optimalen Bewässerung ausgeprägt. Diese Unterschiede zeigen die empfindliche Reaktion der Wurzelsysteme auf Veränderungen in den Bewässerungsbedingungen.

Die Winterlinde zeigte unter optimalen Bewässerungsbedingungen ähnliche Muster in Bezug auf die Wurzelbiomasse. Hier wiesen Winterlinden in nicht isolierte Pflanzgefäße den höchsten Anteil an Wurzelbiomasse auf (4,74 kg), gefolgt von isolierten Pflanzgefäßen (3,82 kg) und Pflanzgefäßen im Boden (3,05 kg). Die prozentualen Unterschiede zwischen optimaler und reduzierter Bewässerung verdeutlichen eine Abnahme des Gesamtwurzelwerks unter reduzierter Bodenbewässerung um 27% in Pflanzgefäßen im Boden, 35% in nicht isolierten Pflanzgefäßen und 32% in isolierten Pflanzgefäßen (Abbildung 49).

Diese Ergebnisse unterstreichen erneut den signifikanten Einfluss der Bewässerung auf das Baumwachstum, auch im Wurzelbereich.

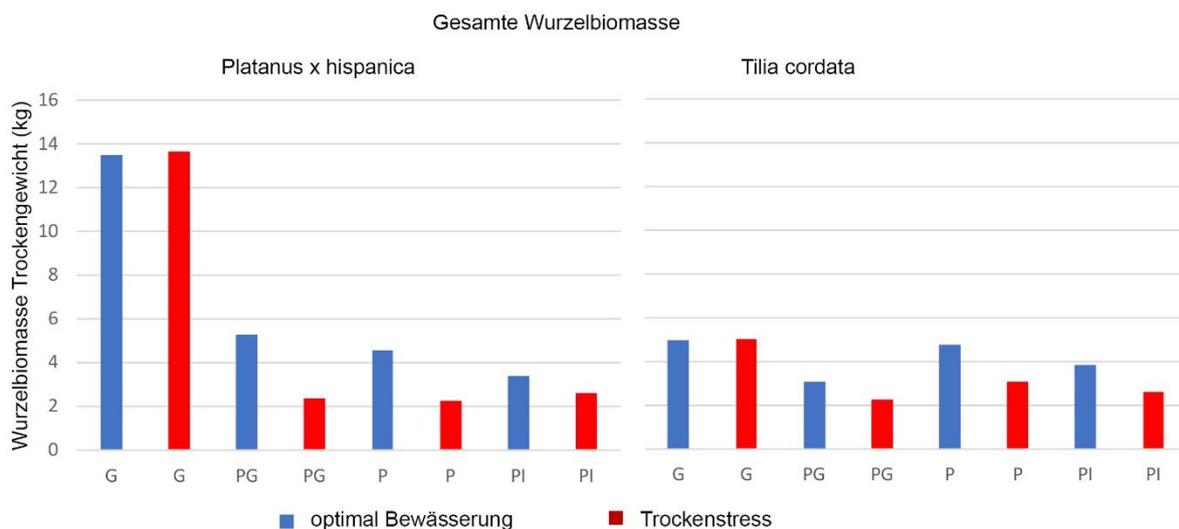


Abbildung 49. Trockengewicht in kg der gesamten Wurzelbiomasse (Fein- und Grobwurzeln) für *P. hispanica* links und *T. cordata* rechts.

4.2.8 Untersuchung der Wurzelstruktur

Bei der Untersuchung der Wurzelstruktur wurde deutlich ersichtlich, dass sich die bereits beschriebenen Wachstumsunterschiede im Stamm- und Kronenbereich bei Winterlinde und Platane im Wurzelbereich fortsetzt. Dies ist nicht nur anhand der ermittelten Wurzelbiomasse deutlich erkennbar, sondern auch an der Ausprägung der Wurzelstruktur erkennbar.

So haben die untersuchten Platanen im Boden eine deutlich größere Fläche mit ihren Wurzeln erschlossen und auch deutlich größeres Volumen im Erdreich durchwurzelt als die untersuchten Winterlinden (Abbildung 50). Die Unterschiede zwischen beiden Baumarten waren so signifikant, dass sie direkt mit bloßem Auge erkennbar waren. Bei beiden Baumarten wuchsen die Wurzeln ca. 20% vom Kronendurchmesser über die Kronentraufe hinaus. Beide Baumarten bildeten eine eher breite und flache Wurzelstruktur aus mit Wurzeltiefen von ca. 1 m für Platanen und ca. 0,6 m für Winterlinden.



Abbildung 50. Links: Freigelegte Wurzeln einer Platane, die frei im Boden gewachsen ist. Rechts: freigelegte Wurzeln einer Winterlinde, die frei im Boden gewachsen ist. Zur besseren Erfassung der Wurzelstruktur wurden die Wurzeln mit Markierungsspray orange eingefärbt.

Einen ähnlich deutlichen Unterschied in der Wurzelstruktur konnte auch bei Platanen und Winterlinden in Pflanzgefäßen festgestellt werden. Nicht nur, dass Platanen in Pflanzgefäßen im Boden zu einer ausgeprägten Wurzelflucht ins angrenzende Erdreich tendierten, trotz Wurzelschutzvlies (Abbildung 23), sondern auch im Inneren der Pflanzgefäße, bildeten Platanen einen deutlich stärkeren Wurzelteppich aus als Winterlinden (Abbildung 51). Während die untersuchten Platanen bereits einen geschlossenen Wurzelteppich aus Ringwurzeln entlang der Pflanzgefäßwand in Pflanzgefäßvarianten gebildet hatten, war bei Winterlinden noch Substrat zwischen den Ringwurzeln zu erkennen. Die Ausprägung von deformierten Wurzeln (Ringwurzeln, geknickte Wurzeln) beschränkte sich bei beiden Baumarten nicht nur auf die unmittelbare Peripherie entlang der Gefäßwand, sondern war auch einige Zentimeter davon entfernt vorhanden. Die Wurzeldeformierung umfasste dabei sowohl Fein- als auch Grobwurzeln (Abbildung 52).



Abbildung 51. 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 erkennbar.



Abbildung 52. Links: Wurzelteppich aus Ringwurzeln einer Platane nach vier Jahren in einem glattwandigen Pflanzgefäß. Mitte: Freigelegte Wurzelstruktur einer Platane und rechts einer Winterlinde nach vier Jahren in einem glattwandigen Pflanzgefäß. Es ist deutlich erkennbar, dass die Wurzeldeformierung die gesamte Wurzelstruktur betrifft.

4.3 Ergebnisse Baumwachstum Versuchsreihe 2

4.3.1 Entwicklung der Stammdurchmesser

Die Ergebnisse zum Durchmesserwachstum des Stammes zeigen für die Platanen in der Versuchsreihe 2 einen höheren Zuwachs in Pflanzgefäßen von Plantener (2,2 cm) im Vergleich zu Pflanzgefäßen von Optigrün (2 cm) und nicht gedämmten Pflanzgefäßen (1,8 cm) (Tabelle 8 und Abbildung 53). Diese Werte deuten an, dass das integrierte Wasserreservoir in den Pflanzgefäßen für eine bessere Wasserversorgung der Bäume sorgt und sich diese im Zuwachs des Stammdurchmesser widerspiegelt.

Tabelle 8. Gesamtdurchmesserzuwachs in cm für Platanen in Versuchsreihe 2 über den Versuchszeitraum 2021 - 2023. Dargestellt sind Mittelwerte (MW), Standardabweichungen (SD), Minima (Min) und Maxima (Max).

Pflanzgefäß	MW	Max	Min	SD
Optigrün	2	2.3	1.8	0.2
Plantener	2.2	2.5	1.8	0.3
nicht isoliertes Pflanzgefäß	1.8	2	1.6	0.2

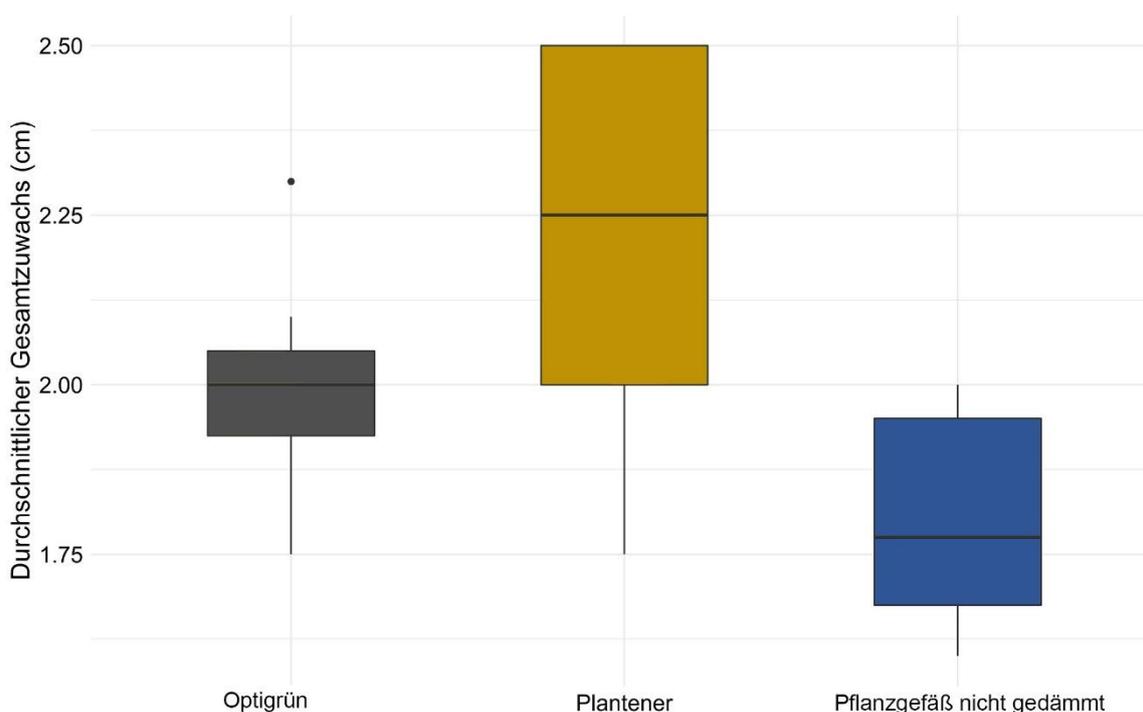


Abbildung 53. Gesamtdurchmesserzuwachs in cm für Platanen in Versuchsreihe 2 über den Versuchszeitraum 2021 - 2023.

Wie auch schon in Versuchsreihe 1 beobachtet, nimmt die Zuwachsrate des Stammdurchmesser mit zunehmender Standdauer im Pflanzgefäß auch bei den Platanen in den Pflanzgefäßen der Versuchsreihe 2 ab (Abbildung 54 und Tabelle 9). Die Abnahme der Zuwachsrate ist in nicht isolierten Pflanzgefäßen signifikant stärker ausgeprägt und tritt schon im zweiten Versuchsjahr (2022) ein im Vergleich zu Pflanzgefäßen von Optigrün und Plantener. Bei Pflanzgefäßen mit integriertem Wasserreservoir (Optigrün und Plantener) tritt dieser Effekt erst im dritten Versuchsjahr ein (2023). Das lässt darauf schließen, dass durch die bessere Wasserversorgung das Wachstumspotential des Wurzelraums im Pflanzgefäß vom Baum besser ausgeschöpft werden kann. Ein Grund für diesen Effekt könnte ein weniger starkes Wurzelwachstum von Platanen in Pflanzgefäßen mit Wasserreservoir sein. Für die Bestätigung dieser Annahme ist jedoch eine Untersuchung der Wurzelstruktur nötig.

Tabelle 9. Jährliche mittlere Zuwachsrate des Stammdurchmessers in cm für Platanen in der Versuchsreihe 2.

Pflanzgefäß	2021	2022	2023	Gesamt
nicht isoliertes Pflanzgefäß	0.81	0.64	0.35	1.80
Plantener	0.84	0.88	0.45	2.17
Optigrün	0.80	0.78	0.42	2.00

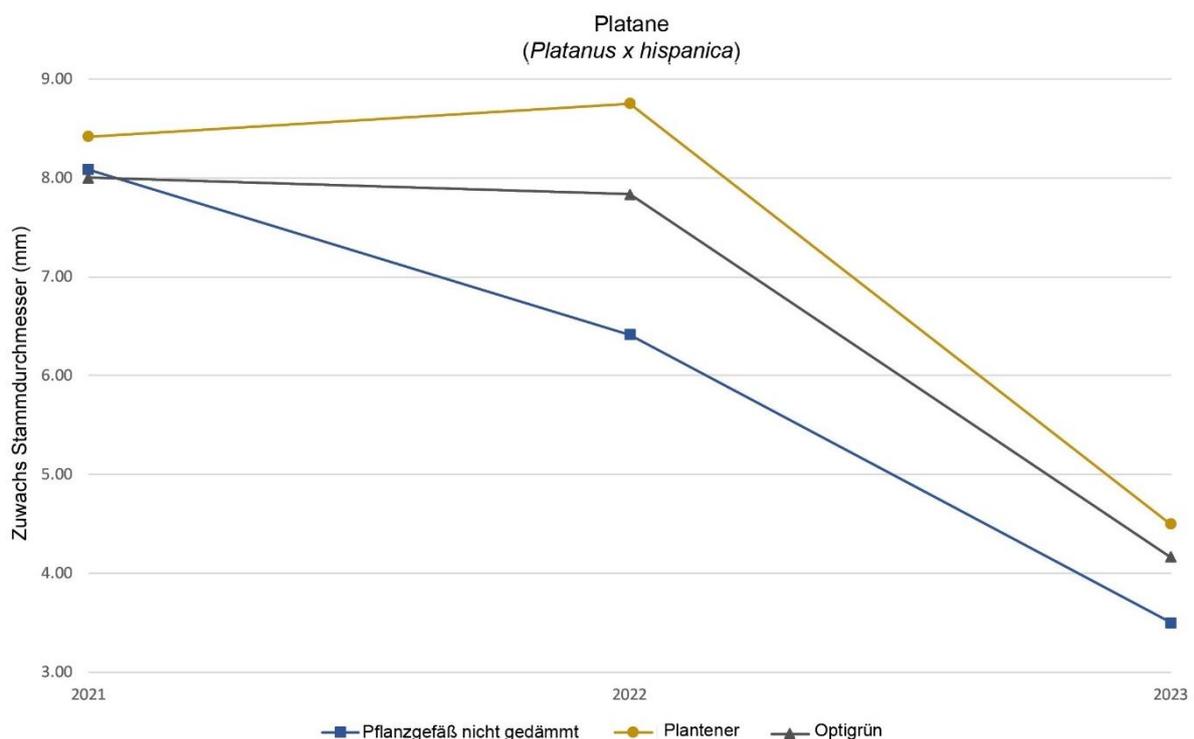


Abbildung 54. Verlauf der jährlichen mittleren Zuwachsrate des Stammdurchmessers in cm für Platanen in der Versuchsreihe 2.

4.3.2 Kronenprojektionsfläche

Platanen in Pflanzgefäßen von Plantener wiesen im dritten Versuchsjahr 2023 der Versuchsreihe 2 die größte Kronenprojektionsfläche mit 2,5 m² im Mittelwert auf. Platanen in nicht gedämmten Pflanzgefäßen wiesen mit 2,3 m² eine leicht größere Kronenprojektionsfläche im Mittelwert auf als Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün mit 2,2 m² (Abbildung 55 und Tabelle 10. Dies ist insofern bemerkenswert, da die Pflanzgefäße von Optigrün und Plantener über integrierte Wasserreservoirs verfügen und die nicht gedämmten Pflanzgefäße nicht. Die tendenziell bessere Wasserversorgung in den Pflanzgefäßen von Optigrün und Plantener sollte somit zur Bildung einer größeren Kronenprojektionsfläche führen als im nicht gedämmten Pflanzgefäß. In Pflanzgefäßen von Plantener ist dies der Fall und die Messergebnisse zur Kronenprojektionsfläche korrelieren mit denen zum Stammdurchmesser. Obwohl Platanen in nicht gedämmten Pflanzgefäßen einen geringeren Stammdurchmesser aufweisen als Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün, bildeten sie im Mittelwert eine größere Kronenprojektionsfläche aus.

Tabelle 10. Kronenprojektionsfläche in m² für Platanen in der Versuchsreihe 2

Pflanzgefäß	MW	Min	Max	SD
Optigrün	2.2	1.6	2.8	0.4
Plantener	2.5	1.8	3.3	0.6
nicht gedämmt	2.3	2.0	2.7	0.3

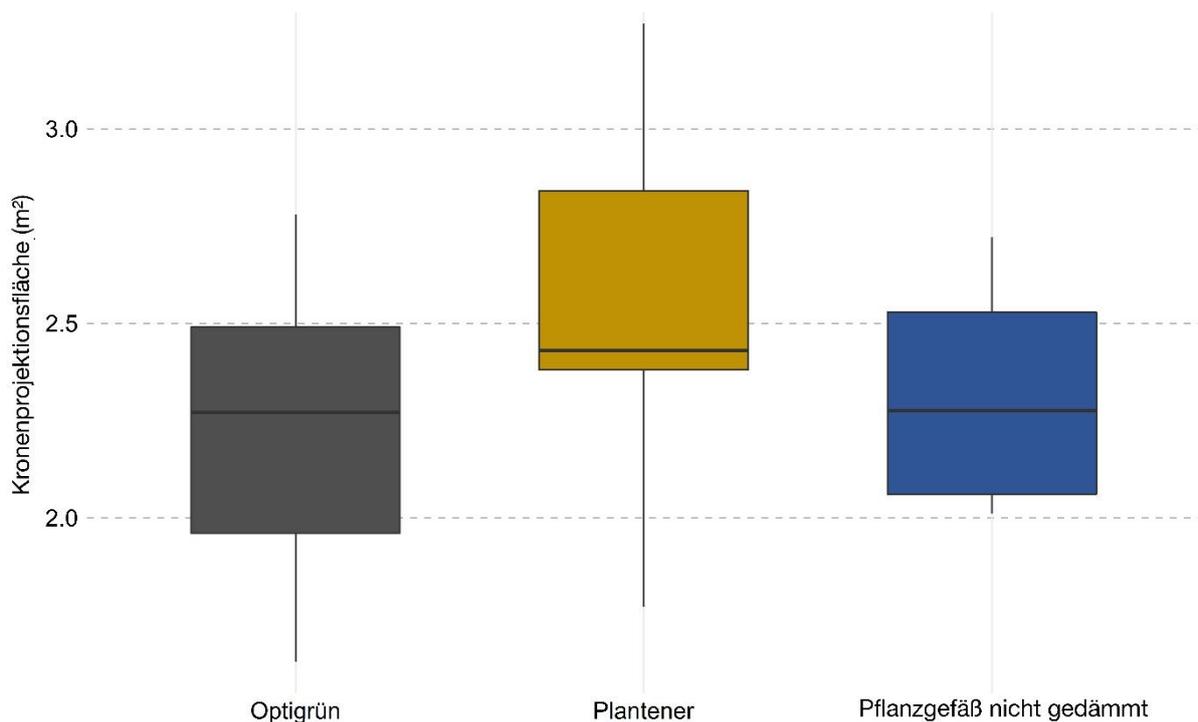


Abbildung 55. Mittelwerte der Kronenprojektionsfläche in m² für Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün (grau), Plantener (gelb) und nicht gedämmten Pflanzgefäßen (blau) im Versuchsjahr 2023.

4.3.3 Blattanzahl

In der zweiten Versuchsreihe wiesen die Platanen unabhängig des Pflanzgefäßes eine ähnliche Blattanzahl im ersten Versuchsjahr 2021 auf. Im zweiten Versuchsjahr 2022 konnte eine Tendenz beobachtet werden, dass Platanen in Pflanzgefäßen mit integriertem Wasserreservoir eine höhere Blattanzahl als in Pflanzgefäßen ohne integriertes Wasserreservoir aufwiesen (Abbildung 56). Dieser Trend verstärkte sich für Platanen in Pflanzgefäßen von Plantener während dem dritten Versuchsjahr 2023, drehte sich jedoch im Vergleich von Platanen in nicht gedämmten Pflanzgefäßen und in Pflanzgefäßen von Optigrün ins Gegenteil um. So wiesen Platanen in Plantener-Pflanzgefäßen mit Abstand die höchste Blattanzahl während der dritten Vegetationsperiode in 2023 auf, gefolgt von Platanen in nicht gedämmten Pflanzgefäßen und Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün. Die geringere Blattanzahl für Platanen in Optigrün-Pflanzgefäßen im Vergleich zu nicht gedämmten Pflanzgefäßen steht konträr zu den Messergebnissen des Stammdurchmesser, korreliert jedoch mit den Messergebnissen zur Kronenprojektionsfläche.

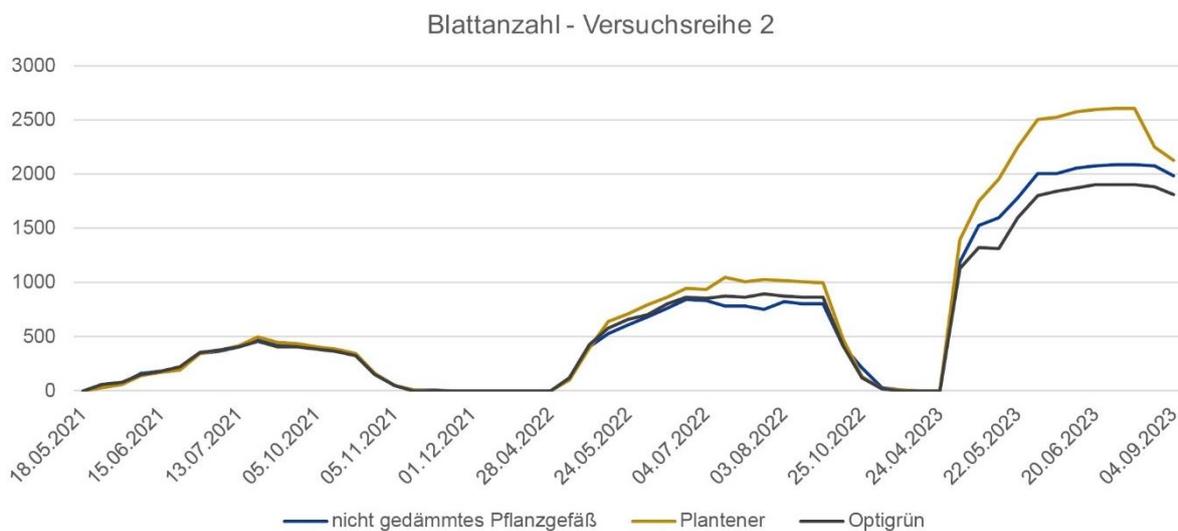


Abbildung 56. Entwicklung der Blattanzahl der Versuchsreihe 2 über den Versuchszeitraum 2021 bis 2023 von *P. hispanica* in nicht isolierten Pflanzgefäßen, Pflanzgefäßen von Plantener und Optigrün.

4.3.4 Blattfläche

In Abbildung 57 ist die mittlere Blattfläche [cm²] der Platanen in drei verschiedenen Pflanzgefäßen für das Jahr 2023 dargestellt (Aufnahme: Ende Juni 2023). Platanen in gedämmten Pflanzgefäßen besaßen die größte Blattfläche, gefolgt von Platanen in Pflanzgefäßen von Plantener. Platanen in Pflanzgefäßen von Optigrün wiesen die kleinste Blattfläche auf. Die Messergebnisse zur Blattfläche sind konträr zu der Annahme, dass die bessere Wasserversorgung in den Pflanzgefäßen von Optigrün und Plantener eine größere Blattfläche zur Folge haben als Platanen in nicht gedämmten Pflanzgefäßen. Aus den Messungen in der Versuchsreihe 2 zu Stammdurchmesser, Kronenprojektionsfläche, Blattanzahl und Blattfläche ist die Tendenz zu erkennen, dass die bessere Wasserversorgung durch ein integriertes Wasserreservoir im Pflanzgefäß zu einem stärkeren Stammdurchmesser führt. Im Kronenbereich trifft diese Korrelation jedoch nur bedingt zu, da die Platanen in Pflanzgefäßen ohne Wasserreservoir teilweise eine größere Kronenprojektionsfläche und höhere Blattanzahl aufwiesen und bei der Blattfläche tatsächlich den größten Wert erreichten. Inwieweit die unterschiedlichen Gefäßformen und die leichten Unterschiede in den Gefäßvolumina eine Rolle hierbei spielen, lässt sich nach drei Jahren noch nicht abschätzen.

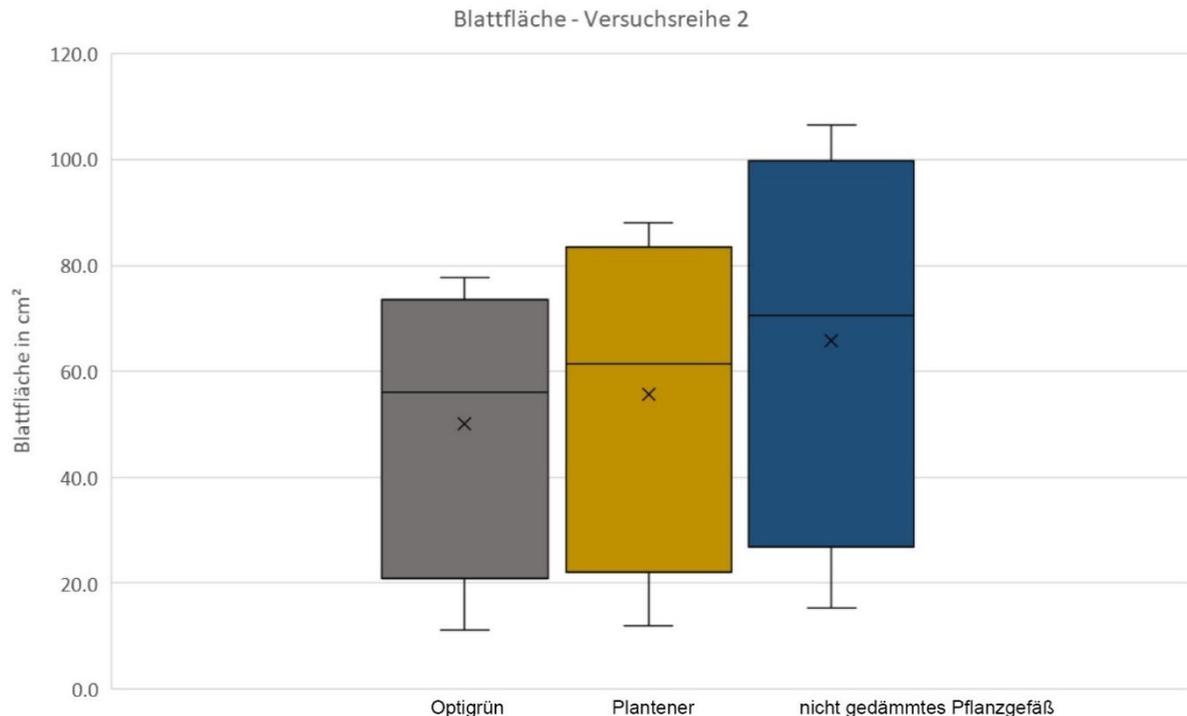


Abbildung 57. Blattfläche in cm² der Platanen in der Versuchsreihe 2 in Pflanzgefäßen von Optigrün (grau), Plantener (gelb) und nicht gedämmten Pflanzgefäßen (blau) im Versuchsjahr 2023.

4.4 Blattphysiologie und Verdunstungsleistung der Versuchsreihe 1

Aufgrund des starken Kronenrückschnitts bei der Pflanzung der Bäume sind die erhobenen Daten der Saftflusssensoren im Versuchsjahr 2020 im weiteren Versuchsverlauf nicht von Bedeutung gewesen. Im Versuchsjahr 2021 war die Stressbelastung beider Baumarten noch zu unterschiedlich, da aufgrund des schnelleren Wachstums der Platane, die Platane proportional stärker unter der Trockenstressbehandlung litt als die Winterlinde. An unseren Messdaten zum Baumwachstum aus dem Versuchsjahr 2022 ist zu erkennen, dass in diesem Jahr bei beiden Baumarten der begrenzte Wurzelraum in den Pflanzgefäßen einen ähnlich starken Einfluss auf das Wachstum und auch auf die Verdunstungsleistung hatte. Die Messdaten aus dem Versuchsjahr 2023 sind aufgrund der beschriebenen Beeinträchtigungen durch Unwetterschäden im Kronenbereich und auch Bewässerungsausfällen nur sehr bedingt aussagekräftig. Daher stellen wir im vorliegenden Schlussbericht nur die Messergebnisse aus dem Versuchsjahr 2022 zur Blattphysiologie und Verdunstungsleistung der Versuchsreihe 1 vor.

4.4.1 Stomatäre Leitfähigkeit

Insgesamt war die stomatäre Leitfähigkeit der Blätter von Platanen im Vergleich zu Winterlinden unter Trockenstress in allen Pflanzvarianten tendenziell höher (Abbildung 58). Im Gegensatz dazu war die stomatäre Leitfähigkeit von Winterlinden im Vergleich zu Platanen bei optimaler Bewässerung in allen Pflanzvarianten tendenziell höher. Im Durchschnitt verringerte Trockenstress die Leitfähigkeit bei beiden Arten erheblich. Platanen und Winterlinden zeigten die höchste stomatäre Leitfähigkeit im Juni und Juli, wenn sie in den Boden gepflanzt wurde. Platanen in Pflanzgefäßen zeigten eine höhere Leitfähigkeit mit optimaler Bewässerung im August und unter Trockenstress im Juni bzw. Juli. Bei Winterlinden hingegen variierte die Leitfähigkeit bei den einzelnen Pflanzvarianten nicht signifikant. Winterlinden zeigten bei fast allen Pflanzgefäß- und Bewässerungsvarianten eine höhere stomatäre Leitfähigkeit im Juni und Juli. Winterlinden in isolierten Pflanzgefäßen mit Trockenstress und in nicht isolierten Pflanzgefäßen mit optimaler Bewässerung wiesen eine höhere Leitfähigkeit im August auf.

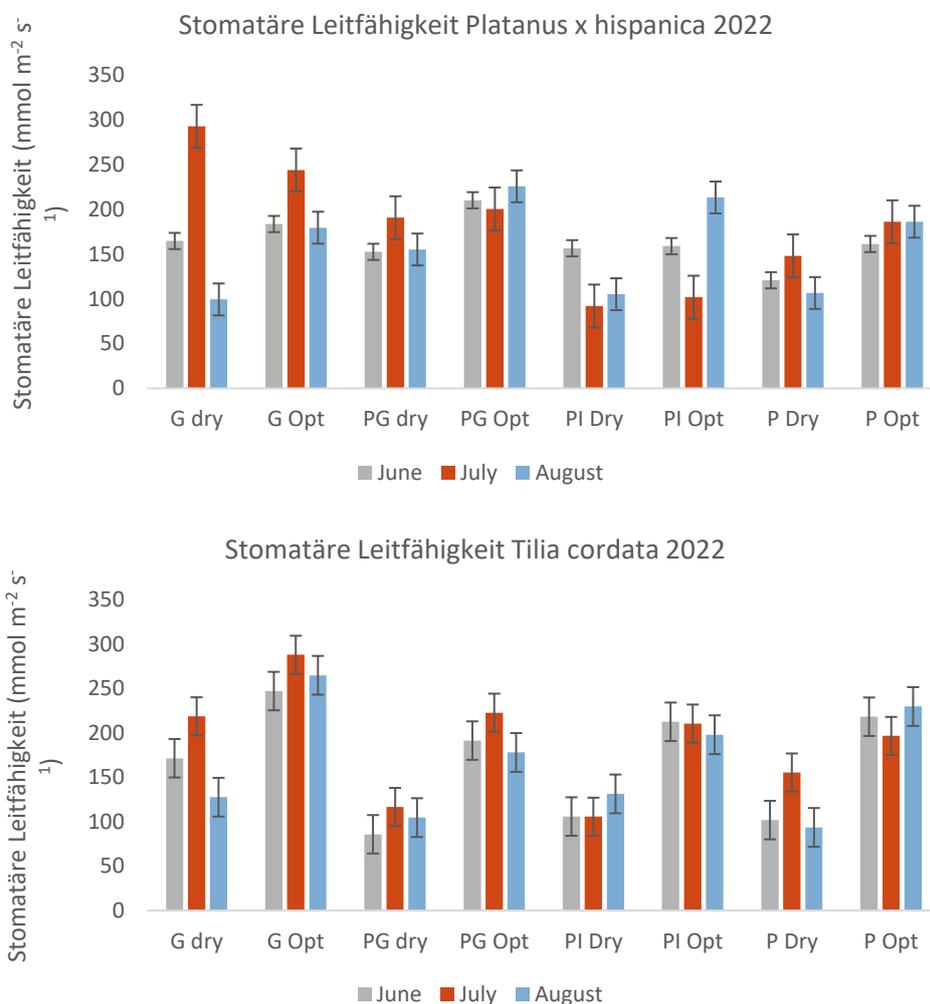


Abbildung 58. Mittelwert und Standardabweichung der stomatären Leitfähigkeit von *P. hispanica* (oben) und *T. cordata* (unten) im Juni, Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.

4.4.2 Blatttranspiration

Die Abbildung 59 zeigt 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. So konnte festgestellt werden, dass die reduzierte Bewässerung bei allen Pflanzvarianten signifikante Reaktionen in Form einer reduzierten Transpirationsleistung erzeugte. Bei Bodenpflanzungen fiel der Unterschied zwischen Trockenstress und optimaler Bewässerung bei Platanen geringer aus als bei Linden. Platanen und Linden in Pflanzgefäßen hatten eine signifikant geringere Transpirationsleistung als Platanen und Linden im Boden. Bei Pflanzgefäßpflanzungen fiel der Unterschied zwischen reduzierter Bewässerung und optimaler Bewässerung deutlich stärker aus als bei Bodenpflanzungen. 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.

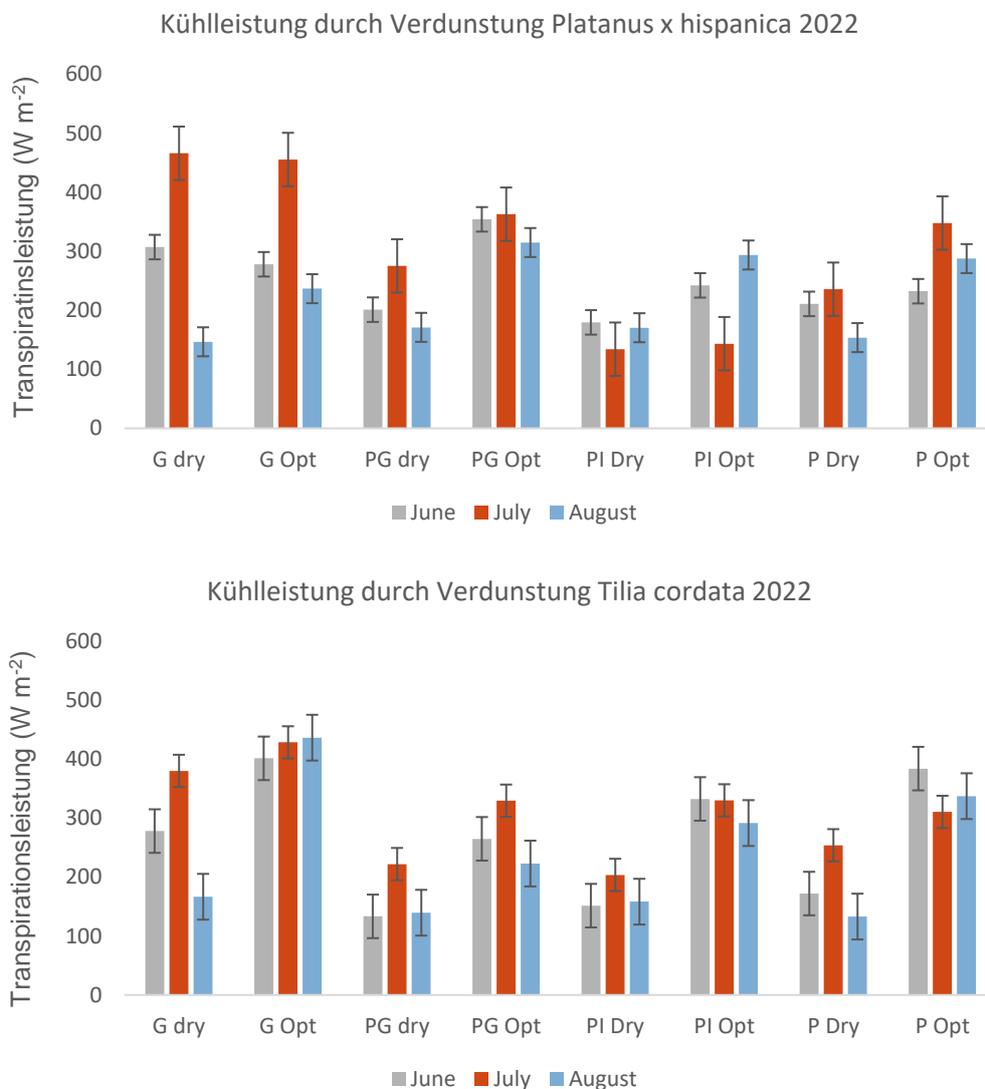


Abbildung 59. Mittelwert und Standardabweichung der Kühlleistung durch Blattverdunstung von *P. hispanica* (oben) und *T. cordata* (unten) im Juni, Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.

4.4.3 Blattwasserpotential

Die Untersuchungen zum Blattwasserpotenzials zur Mittagszeit (Abbildung 60) zeigt, dass beide Arten sehr trockenheitsempfindlich sind, da die negativen Wasserpotenzialwerte unter -1,5 MPa lagen. Dieser Schwellenwert zeigt an, dass der Boden zwar noch Wasser enthält, es aber für die Wurzeln schwierig ist, dieses Wasser aus dem Boden zu ziehen. Winterlinden wiesen ein signifikant niedrigeres Blattwasserpotential im Vergleich zu Platanen auf. Von allen Baumarten und Pflanzvarianten wiesen Winterlinden in nicht isolierten Pflanzgefäßen mit Trockenstress das geringste Blattwasserpotential im Juli 2022 auf. Dies geht einher mit der bereits beschriebenen Beobachtung des Blattverlustes der genannten Pflanzvariante aufgrund der Trocken- und Hitzeperiode im Juli 2022.

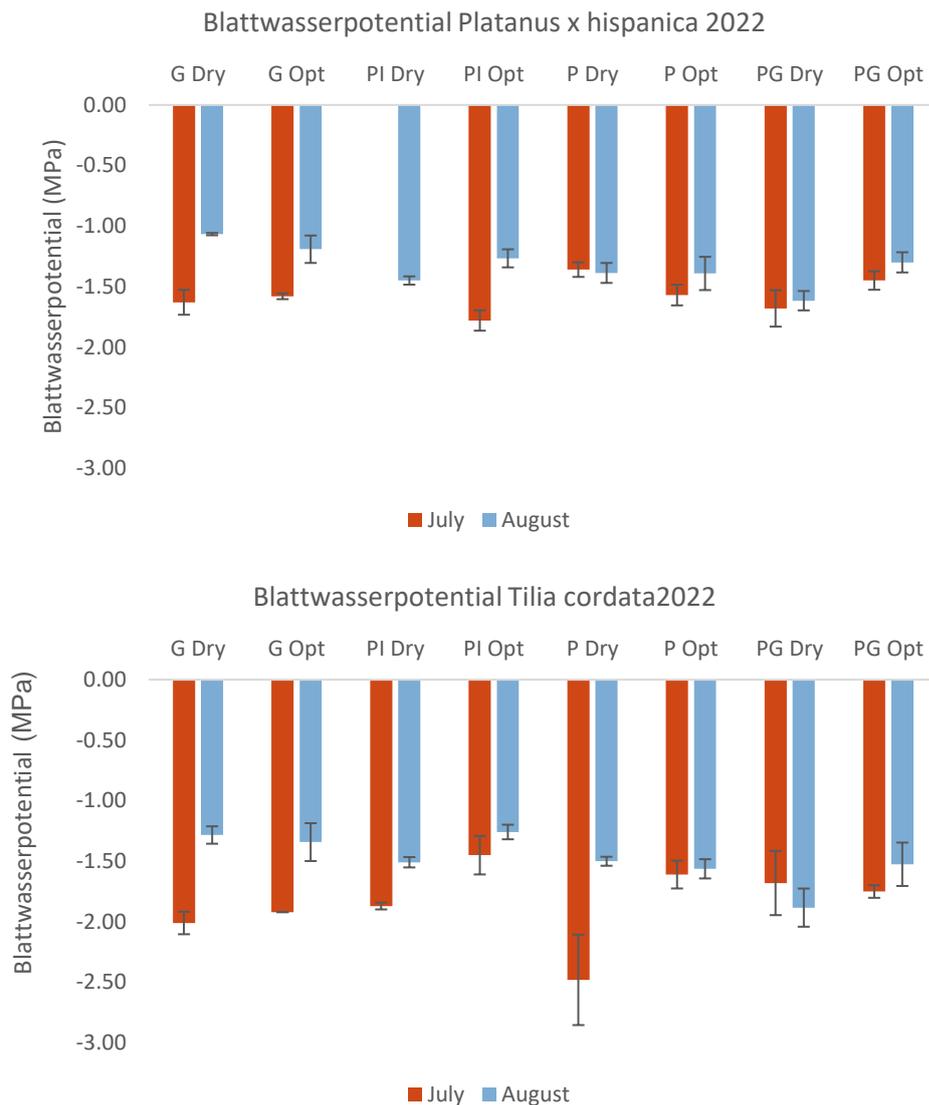


Abbildung 60. Mittelwerte und Standardabweichung des mittäglichen Blattwasserpotentials von von *P. hispanica* (oben) und *T. cordata* (unten) im Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.

4.4.4 Chlorophyllkonzentration im Blatt

Die Chlorophyllkonzentration lag in der Vegetationsperiode 2022 bei *T. cordata* bei allen Pflanz- und Bewässerungsvarianten höher als bei *P. hispanica*. Ausgenommen davon sind Platanen in Pflanzgefäßen im Boden mit optimaler Bewässerung, die eine leicht höhere Chlorophyllkonzentration als Winterlinden im Juli und August 2022 aufwiesen (Abbildung 61). Auffällig ist, dass in Winterlinden im Pflanzgefäß mit optimaler Bewässerung eine signifikant geringere Chlorophyllkonzentration gemessen wurde als bei Winterlinden in der gleichen Pflanzvariante mit Trockenstress. Bei Platanen in der gleichen Pflanzvariante wurde hingegen eine höhere Chlorophyllkonzentration bei optimaler Bewässerung gemessen. Die restlichen Pflanzvarianten weisen bei beiden Baumarten nur geringe Unterschiede in der Chlorophyllkonzentration zwischen Trockenstress und optimaler Bewässerung auf.

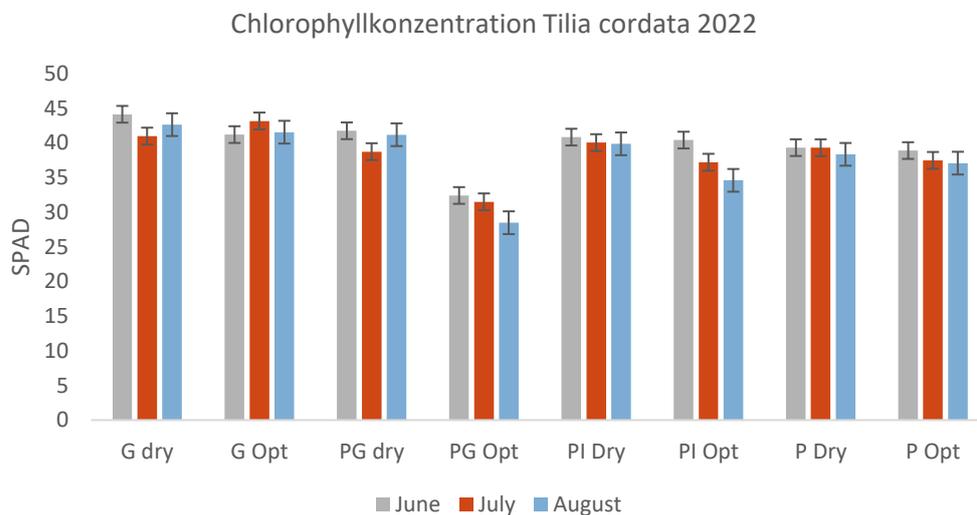
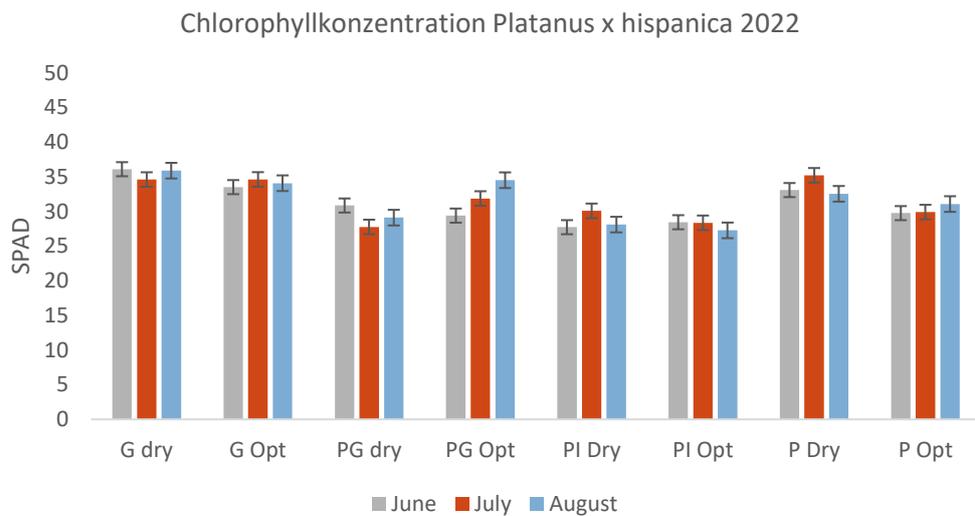


Abbildung 61. Mittelwerte und Standardabweichung der Chlorophyllkonzentration in den Blättern von *P. hispanica* (oben) und *T. cordata* (unten) im Juni, Juli und August 2022. G steht für Boden, PG für Pflanzgefäß im Boden, PI für isoliertes Pflanzgefäß und P für nicht isoliertes Pflanzgefäß; dry steht für Trockenstress und Opt für optimale Bewässerung.

4.5 Simulationsmodell zu Wachstum und Ökosystemleistung von Bäumen in Pflanzgefäßen

4.5.1 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Platane

Die Platane wird in der Simulation als stellvertretende Baumart für schnellwüchsige und trockenheitstolerante Baumarten verwendet. In Abbildung 62 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. 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.

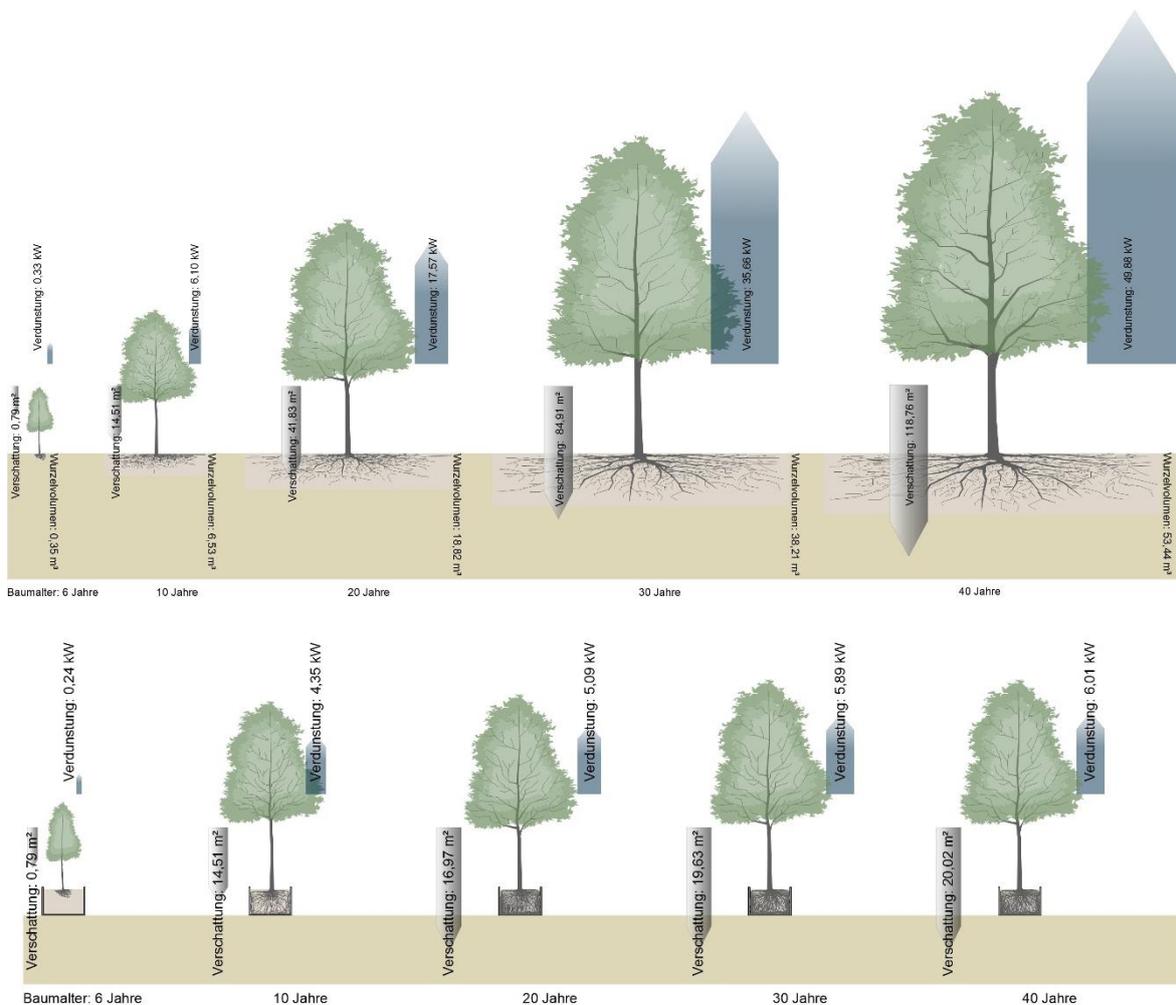


Abbildung 62. Ökosystemleistungen von Platanen im Boden (oben) und im Pflanzgefäß (unten) in bestimmten Altersklassen. Grafisch dargestellt sind die Kühlleistung durch Verdunstung, die verschattete Fläche und der benötigte Wurzelraum.

4.5.2 Vergleich zwischen Boden- und Kübelpflanzung: Beispiel Winterlinde

Die Winterlinde wird in der Simulation als stellvertretende Baumart für langsam wüchsige und weniger trockenheitstolerante Baumarten verwendet. In Abbildung 63 sind zwei Zeitachsen dargestellt, die den Wachstumsverlauf einer Winterlinde im Boden (oben) und in einem Pflanzgefäß mit 2 m³ Volumen (unten) sowie die entsprechende Ökosystemleistung in Form von Verdunstung und Verschattung zeigen. 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 voraussichtlich nach 10 bis 15 Jahren Wachstum im Pflanzgefäß. In dieser Konsequenz erreicht in dieser Simulation im Alter von 40 Jahren die Winterlinde im Boden eine Verdunstungsleistung von knapp 22 kW während der gleiche Baum im Pflanzgefäß nur ca. 5 kW erreicht. Um eine vergleichbare Verdunstungskühlung zu erreichen müsste als Ersatz für einen im Boden wachsende Platane mindestens 4 Platanen 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.

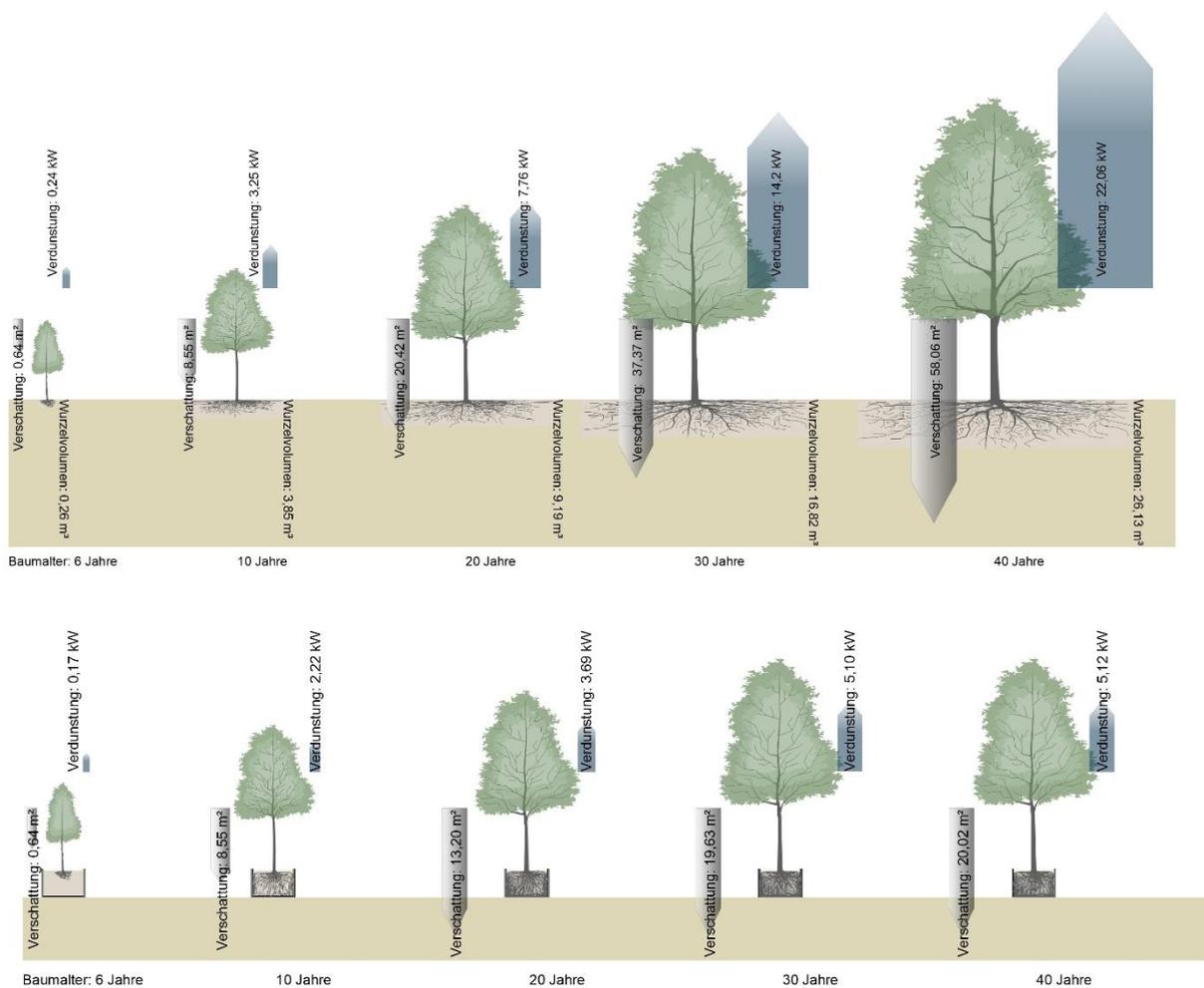


Abbildung 63. Ökosystemleistungen von Winterlinden im Boden (oben) und im Pflanzgefäß (unten) in bestimmten Altersklassen. Grafisch dargestellt sind die Kühlleistung durch Verdunstung, die verschattete Fläche und der benötigte Wurzelraum.

5. Arbeitspaket 3

5.1 Best-Concept-Fallstudie

In fünf Fallstudien wurden unterschiedliche Konzepte realisierter Projekte analysiert und untersucht wie die gefunden Konzepte, die genannten zeitlichen Aspekte berücksichtigen und integrieren sowie die Koordination der involvierten Akteure organisiert ist. Für die Analyse wurden Zeitdiagramme entwickelt, die grafisch die Verknüpfungen der einzelnen zeitlichen Aspekte und deren Interaktion mit den involvierten Akteuren darstellen. Die Zeitdiagramme haben sich in der Analyse und im Entwurf als hilfreiche Darstellungsmethode bewiesen, um Logikbrüche im Entwurfskonzept aufzudecken.

Zu den Fallstudien zählen der Tour de la biodiversité in Paris, der Bosco Verticale in Mailand, die Brown Hart Gardens in London, der Innenhof des Rathauses Posen und die Orangerie vom Schloss Freyr in Belgien.

Die Fassaden des Wohnturms Tour de la biodiversité im Pariser Zentrum sind mit 400 Pflanzen aus 22 Arten (Bäume, Sträucher, Kletterpflanzen) begrünt, um das Ziel eines biodiversen Gebäudes zu erreichen und negativ belegte Image von Hochhäusern in Paris zu überwinden (Chatenet, Mathieu, pers. Komm., 23 Juni 2020). Für die Umsetzung wurden fassadenintegrierte Stahlröhren als Pflanzgefäße mit einem geringen Volumen von ca. 0,17 m³ verwendet (Chatenet, Mathieu, pers. Komm., 23 Juni 2020). Das Konzept des Chasmophyten soll eine lange Lebensdauer des Baumes im Pflanzgefäß ermöglichen. Langsam wachsende Gehölze (*Pinus nigra ssp. Corsicana*, *Pinus nigra ssp. Salzmannii*, *Quercus pubescens*, *Quercus robur*), die in der Lage sind in Felsspalten zu gedeihen, sind dabei von zentraler Bedeutung für das Konzept (Chatenet, Mathieu, pers. Komm., 23 Juni 2020) (Abbildung 64).

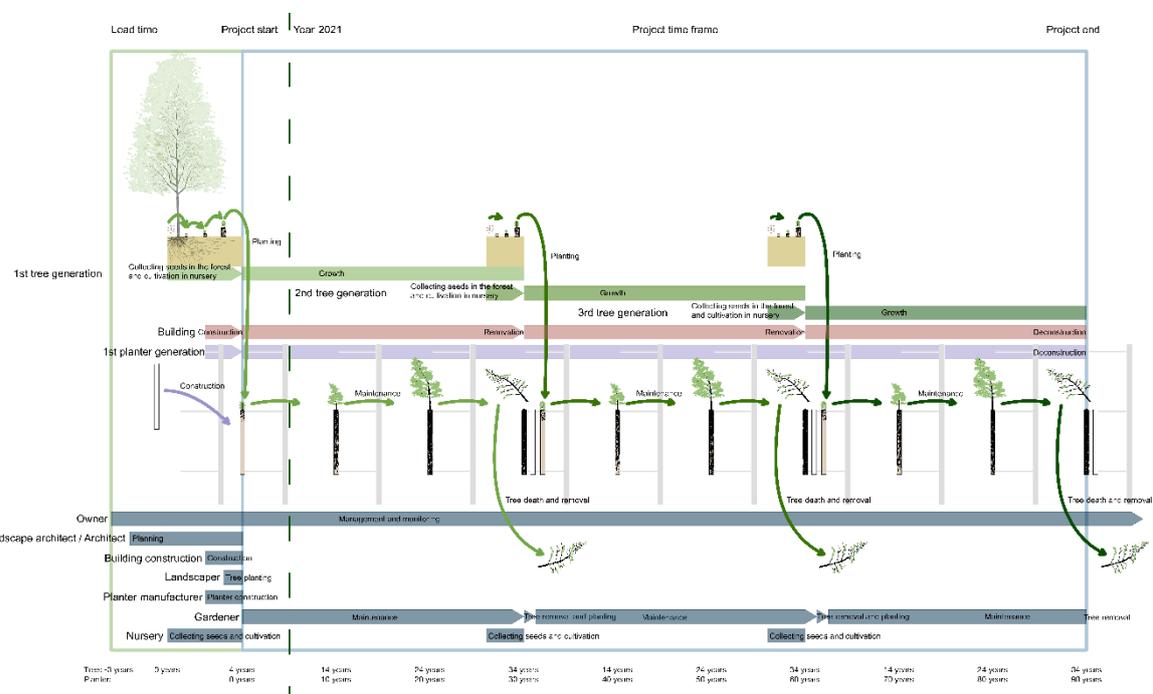


Abbildung 64. Zeitdiagramm des Tour de la biodiversité.

Das Ziel des Bosco Verticale ist es mit 20000 Pflanzen aus 148 Arten, davon 700 Bäume aus 23 Arten, die Fassaden von zwei Wohntürmen zu begrünen und somit die thermische Belastung der Fassade zu reduzieren und das Mikroklima der Gebäude zu verbessern sowie die Biodiversität der Umgebung aufzuwerten [3]. Die Baumarten wurden nachfolgenden Anforderungen ausgewählt: windtolerant, schnittverträglich, Resistent gegenüber Krankheitserregern, Allergiker freundlich, hitzeverträglich, tolerant gegenüber Luftverschmutzung, keine Früchte, sommergrün, tolerant gegenüber direkter Sonneneinstrahlung und Schatten und pflegeleicht [3]. Große Pflanzgefäße (1,5 bis 10,5 m³), die die Balkone als Brüstung umspannen, wurden verwendet und mit verschiedenen Pflanzen (Bäume, Sträucher, Stauden) bepflanzt und somit Pflanzgefäßgesellschaften gebildet [3]. Das Zeitdiagramm für den Bosco Verticale (Abbildung 65) zeigt, dass die Pflanzgefäßgesellschaften in der Lage sind einzelne Pflanzenausfälle zu kompensieren, in dem die übrigen Pflanzen mit der Zeit, der natürlichen Sukzession folgend, in die entstandene Lücke wachsen werden. Die Abdichtungsfolie sowie die Wurzelschutzfolie des Betongefäßes werden voraussichtlich 50 Jahre halten. Konsequenterweise ist bei einer Leckage die Reparatur der Folien nötig, dies bedeutet die Entfernung der bestehenden Pflanzen und Substrat sowie deren Austausch durch neues Substrat und Pflanzen. Dieses Praxisbeispiel zeigt auf, dass nicht unbedingt immer das Pflanzgefäß den Baum überlebt, sondern der Baum ggf. das Pflanzgefäß überleben kann.

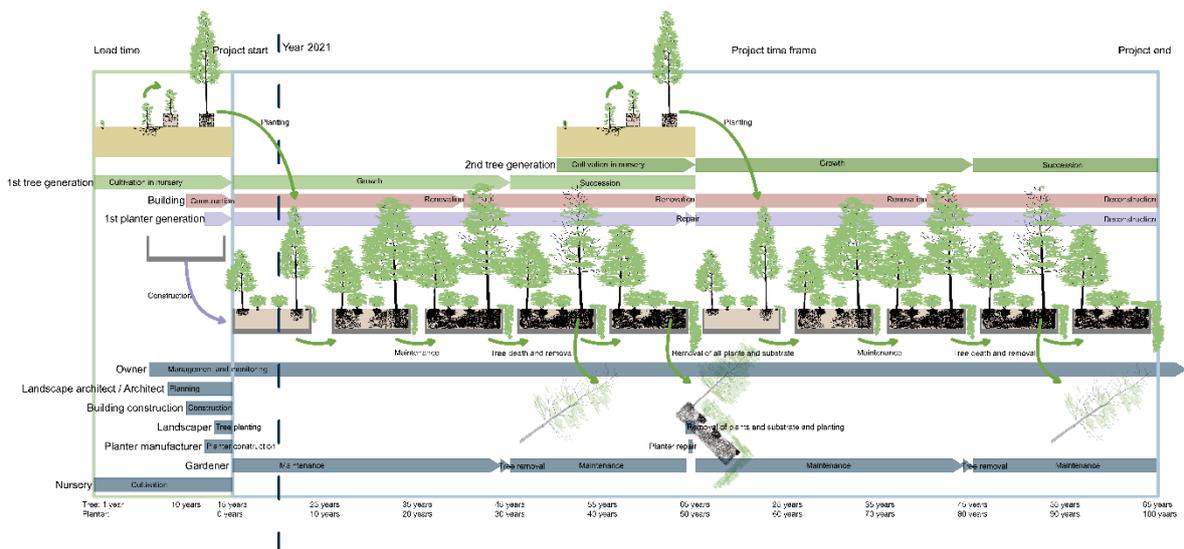


Abbildung 65. Zeitdiagramm des Bosco Verticale.

Die Brown Hart Gardens befinden sich auf dem Dach eines Umspannwerkes in London und wurden 2010 umgestaltet [110]. Ziel des neuen Entwurfs ist es einen flexiblen multifunktionalen öffentlichen Freiraum zu schaffen, um als Aufenthaltsraum für Anwohner, Besucher und Arbeiter in der Umgebung zu dienen [111]. Dazu wurden mobile Pflanzgefäße mit Stauden und Kräutern für den zentralen Bereich des Platzes und Bäume in stationären Pflanzgefäßen am Platzrand verwendet [112]. So kann flexibel auf verschiedene Nutzungsanforderungen eingegangen werden. In die stationären Pflanzgefäße wurden Blaseneshen (*Koelreuteria paniculata*) als Solitäre gepflanzt mit dem Ziel einer dauerhaften Nutzung [113]. In diesem Praxisbeispiel lag der Fokus auf der ästhetischen Wirkung der Bäume im Pflanzgefäß, ohne dabei zu berücksichtigen, dass der Baum ggf. dieses Ziel für den geplanten Zeitraum nicht erfüllen kann, da er aus ästhetischen Gründen schon vorher ausgetauscht wird. An dieser Diskrepanz zwischen Ziel und zeitlichen Aspekten wird deutlich, dass im Entwurfskonzept die zielführende Balance zwischen Ziel und zeitlichen Aspekten kohärent sein muss (Abbildung 66).

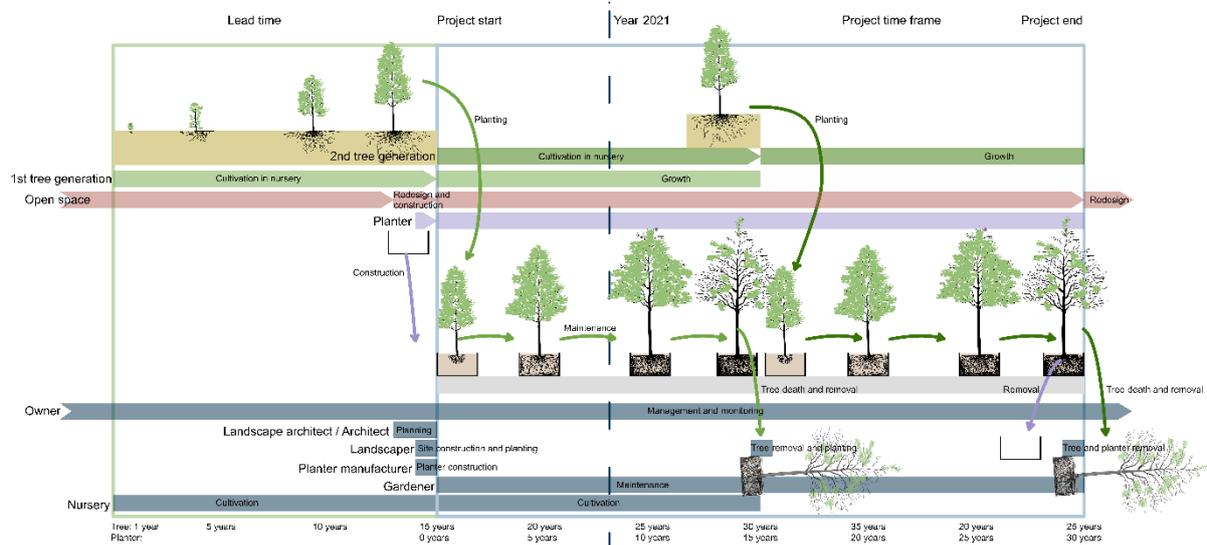


Abbildung 66. Zeitdiagramm der Brown Hart Gardens.

Der Innenhof des Rathauses in Posen wurde 2015 nach einem Entwurf des Ateliers Starzak Strebicki von einem Parkplatz in einen öffentlichen Freiraum verwandelt. Der Entwurf verwendet bewegliche Pflanzgefäße und Bänke, um eine flexible Gestaltung des Raums für Veranstaltungen zu ermöglichen und den Bedürfnissen verschiedener sozialer Gruppen im Hof gerecht zu werden [114]. Die Neugestaltung des Innenhofs wurde in drei Phasen durchgeführt. Phase 0 umfasste die Beseitigung des Parkplatzes. In Phase 1 wurde der Hof für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht und im Zeitraum 2015 bis 2016 mit Bänken und Pflanzgefäßen ausgestattet. Ein Ausstellungssystem und ergänzendes Stadtmobiliar wurden in Phase 2 hinzugefügt, mit der die Gestaltung des Innenhofs 2019 abgeschlossen wurde [115,116]. Sechs verschiedene Baumarten (*Platanus x hispanica*, *Tilia cordata*, *Betula utilis*, *Acer rubrum*, *Acer campestre*, *Cerasus serrulata*) werden in den 20 Pflanzgefäßen mit insgesamt 20 Bäumen (ein Baum pro Pflanzgefäß) verwendet.

Die geplante Verpflanzung der Bäume in Grünanlagen von Poznan (Abbildung 67), sobald sie zu groß für die Pflanzgefäße sind, und ihr Ersatz durch kleinere Bäume ist ein wichtiger Aspekt des Projekts, um die Projektziele zu erreichen (Starzak, Jola, pers. Mitt., 11. Mai 2021). Unter Berücksichtigung der geplanten Baumverpflanzung, der Baum- und Pflanzgefäßgröße und auf der Grundlage von fünf Experteninterviews werden die Bäume im Durchschnitt maximal fünf Jahre in den Pflanzgefäßen bleiben. Das Projekt endet, wenn die Möbel und Pflanzgefäße nicht mehr in Ordnung sind, was mit einer Neugestaltung des Hofes einhergeht. Die verpflanzten Bäume werden am neuen Standort den Zeitrahmen des Projektes überdauern.

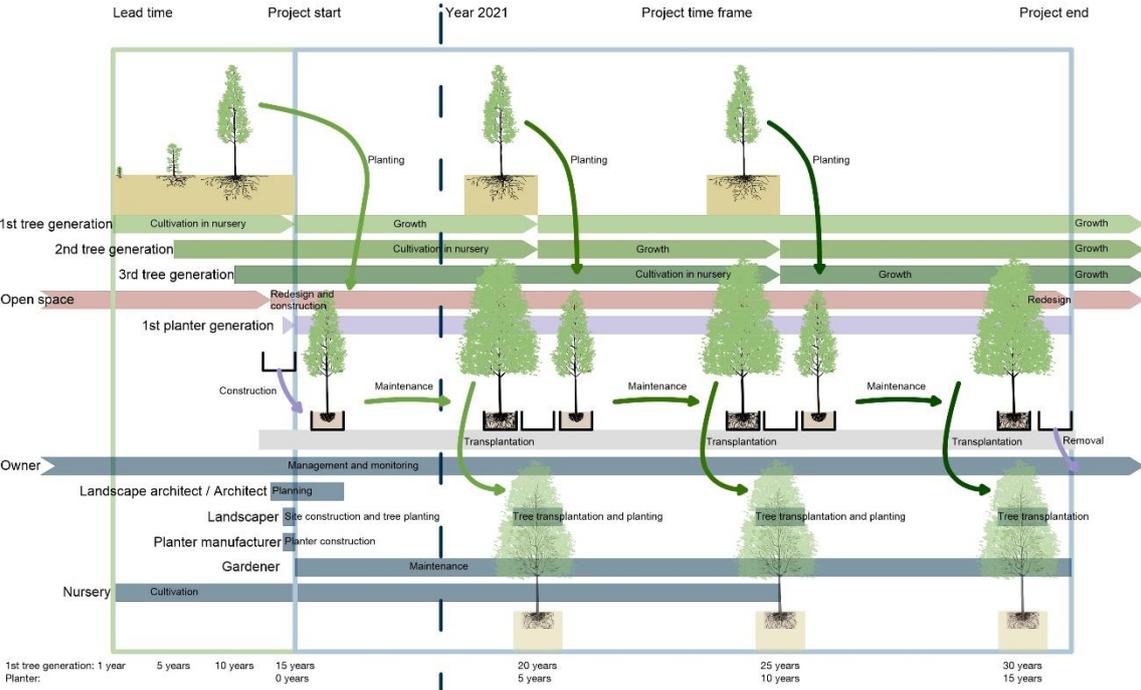


Abbildung 67. Zeitdiagramm des Innenhofes der Stadthalle Posen.

Die Orangenbäume in der Orangerie des Schlosses Frey sollen die ältesten Bäume in Pflanzgefäßen Europas sein [55]. Die Bäume kamen zwischen 1711 und 1737 auf Schloss Frey an. Das geschätzte Alter der Bäume liegt zwischen 300 und 350 Jahren, und sie werden seither in Pflanzgefäßen gehalten [97]. Das Ziel dieses Projekts ist es, die Orangenbäume gesund zu erhalten. Insgesamt gibt es 23 Orangenbäume in diesem Alter. Die Bäume haben mehrere Kriege, Stürme, Überschwemmungen und Zeiten der Vernachlässigung überstanden [97]. Die heutige Pflege umfasst eine Bewässerungspraxis, die auf Trockenstresssymptome reagiert, um nicht Staunässe durch Überbewässerung zu riskieren [97]. In den Baumkronen werden zweimal im Jahr (Mai und September) Wassertriebe zurückgeschnitten, um eine gesunde Krone mit kräftigem Blattwachstum auszubilden [97]. Regelmäßige Düngung fördert das Blattwachstum, ohne die Wurzeldichte zwischen den Umtopfungen zu sehr zu erhöhen [97]. Die Bäume werden um den 15. Oktober ins Haus geholt und am 1. Mai ins Freie gebracht [97]. Ein wichtiger Teil des Pflegeplans ist der Wurzelchnitt und das Umtopfen der Bäume, dabei werden die äußeren 10 cm der Wurzeln und des Substrats abgestochen und durch nährstoffreiches Substrat ersetzt.

Die Pflanzgefäße sind aus Holz gefertigt, deren Bretter an der Pflanzgefäßwand entfernt werden können, um Zugang zu den Wurzeln zu erhalten [97]. Die Pflanzgefäße müssen alle 15 – 30 Jahre durch neue ersetzt werden [97]. Das Ereignis des Umtopfens und Wurzelrückschnitts markiert im Zeitdiagramm (Abbildung 68) den Beginn und das Ende eines 15 Jahre dauernden Pflegezyklus. Die Pflanzgefäße werden synchron mit dem Umtopfen und dem Wurzelrückschnitt hergestellt und ersetzt. Dieses Praxisbeispiel zeigt auf, dass durch einen detaillierten Pflegeplan der Baum nicht nur das Pflanzgefäß überleben, sondern mehrere Jahrzehnte sogar Jahrhunderte alt werden kann. Dafür ist der Wurzelrückschnitt eine essentielle Maßnahme, da dadurch immer wieder in regelmäßigen Abständen neuer Wurzelraum für den Baum geschaffen wird. Die Folge ist jedoch, dass der Baum auf Dauer ein rigoros begrenztes Kronenvolumen erhält.

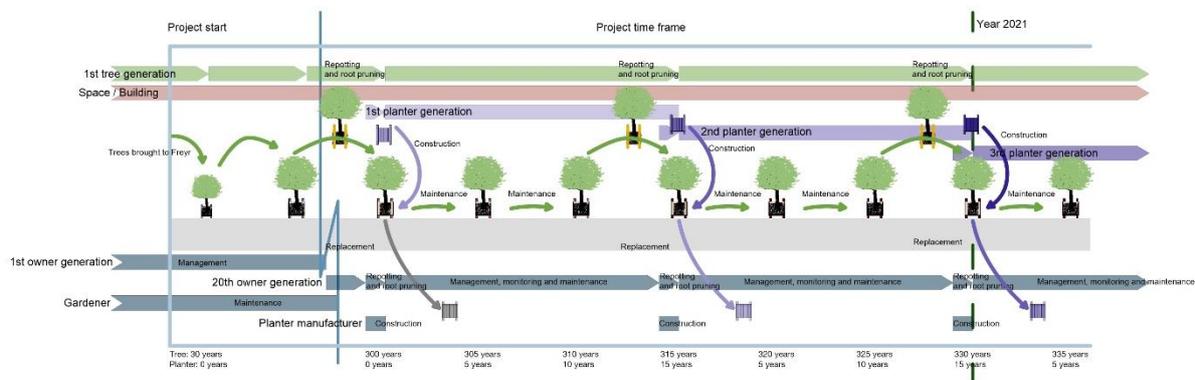


Abbildung 68. Zeitdiagramm der Orangerie des Schlosses Frey.

Die Best-Concept-Fallstudie wurde abgeschlossen und das daraus resultierende Manuskript wurde im August 2022 bei der begutachteten Zeitschrift "Land" (MDPI publishers) unter dem Titel „Trees in Planters – A Case Study of Time-Related Aspects“ veröffentlicht. Die Fallstudie kann kostenlos bei „Land“ unter folgendem Link aufgerufen werden: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/8/1289>.

5.2 Patentrecherche

In der Patentrecherche wurde in der Datenbank des Europäischen Patentamts nach Patenten, die sich mit Pflanzgefäßen befassen, gesucht. Die bei der Suche verwendeten Stichworte waren: plant pot, tree container, tree pot, tree planter, Pflanzgefäß, Baum Topf, Pflanzkübel, Pflanztopf und Baumkübel. Insgesamt konnten in der Suche 420.633 Treffer erzielt werden, von denen die meisten zu den englischen Stichworten gefunden wurden. Wurden mehr als 1.000 Treffer zu einem Stichwort gefunden, so wurden nur die relevanten Patente unter den ersten 1.000 Treffern für die Patentrecherche ausgewertet.

Zu den Stichworten plant pot, tree container, tree pot und tree planter wurden jeweils deutlich über 1000 Patenteinträge gefunden, somit wurden nur die ersten 1000 Einträge zu diesen Stichworten ausgewertet (Tabelle 11). Bei den deutschsprachigen Stichworten blieb die Anzahl gefundener Einträge jeweils deutlich unter 1000 Einträgen, somit wurde jeder gefundene Eintrag ausgewertet.

Tabelle 11. Ergebnisse der Stichwortsuche in der Datenbank des Europäischen Patentamts

Stichwort	Treffer gesamt	Analysierte Treffer	Relevante Patente
Plant pot	203.023	1000	363
Tree container	150.111	1000	70
Tree pot	60.993	1000	78
Tree planter	4.389	1000	56
Pflanzgefäß	664	664	114
Baum Topf	538	538	15
Pflanzkübel	300	300	39
Pflanztopf	613	613	97
Baumkübel	2	2	1

Aufgrund von Dopplungen bei den Treffern reduzierte sich die Zahl der ausgewerteten Patente von 833 auf 692. Die Patente wurden in vier Zielgruppen kategorisiert: Krautige Gewächse, Krautige Gewächse/Gehölze, Gehölze und Bonsai. Am meisten Patente wurden in der Kategorie Krautige Gewächse / Gehölze (388) gefunden. Für die Zielgruppe Krautige Gewächse waren es 180 Patente und für die Zielgruppe Gehölze 121 Patente. Für die Zielgruppe Bonsai wurden nur 3 Patente gefunden und somit am wenigsten.

Basierend auf der Literaturrecherche konnten fünf Eigenschaften von Pflanzgefäßen als vitalitätsfördernd für Bäume festgestellt werden. Eigenschaften zur Reduzierung von Ringwurzelwachstum, ein integriertes Wasserreservoir, Wurzelbelüftung, Wärmedämmung und abnehmbare Wände. Die Recherche ergab, dass ein Pflanzgefäß vier der fünf genannten Eigenschaften vereint (Tabelle 12) und zehn Pflanzgefäße, die jeweils drei von fünf Eigenschaften besitzen (Tabelle 13). Die angesprochenen Zielgruppen sind hierbei Gehölz und Krautiges Gewächs / Gehölz. Dies lässt darauf schließen, dass die Kombination mehrerer vitalitätsfördernder Eigenschaften auch in großen Pflanzgefäßen realisierbar und in der Praxis anwendbar ist.

Tabelle 12. Patente mit vier von fünf vitalitätsfördernden Pflanzgefäßeigenschaften

Patentnummer	Zielgruppe	Wurzelschnitt / Reduzierung Ringwurzelbildung	Wasserreservoir	Wurzelbelüftung	Abnehmbare Wand	Wärmedämmung
EP0596519A1	Krautiges Gewächs	ja	ja	ja	ja	nein

Tabelle 13. Patente mit drei von fünf vitalitätsfördernden Pflanzgefäßeigenschaften

Patentnummer	Zielgruppe	Wurzelschnitt / Reduzierung Ringwurzelbildung	Wasserreservoir	Wurzelbelüftung	Abnehmbare Wand	Wärmedämmung
JP2001275500A	Gehölz	nein	ja	Ja	nein	ja
US2018153107A1	Gehölz	ja	nein	ja	ja	nein
US2013174484A1	Gehölz	ja	ja	ja	nein	nein
DE1889536A1	Krautiges Gewächs / Gehölz	ja	nein	ja	ja	nein
CN109496604A	Krautiges Gewächs / Gehölz	nein	ja	ja	nein	Ja
CN204132054U	Krautiges Gewächs / Gehölz	nein	ja	ja	ja	nein
CN206978157U	Gehölz	ja	ja	ja	nein	nein
DE2202712A1	Krautiges Gewächs / Gehölz	ja	ja	nein	ja	nein
DE20320745U1	Krautiges Gewächs / Gehölz	ja	ja	nein	ja	nein
EP1889536A1	Krautiges Gewächs / Gehölz	ja	nein	ja	ja	nein

In der Zielgruppe Bonsai wiesen zwei von drei gefunden jeweils das integrierte Wasserreservoir als vitalitätsfördernde Eigenschaft auf. Aufgrund der sehr geringen Trefferzahl zur Zielgruppe Bonsai, wird diese in der weiteren Auswertung der Patentrecherche nicht berücksichtigt.

In der Patentrecherche ist aufgefallen, dass integrierte Wasserreservoir und Wurzelbelüftung unabhängig der Zielgruppe eine häufige Eigenschaft von Pflanzgefäßen sind (Abbildung 69). Abnehmbare Wände zur Wurzelpflege und leichterem Verpflanzen sind noch in der Zielgruppe Gehölze mit über 20 % stark vertreten. Eigenschaften zur Reduzierung von Ringwurzelbildung sind in der Zielgruppe Gehölze noch mit knapp über 10 % vertreten, sind in den anderen Zielgruppen jedoch nur selten Bestandteil des Pflanzgefäßes. Die, wie in der Literatur beschriebene als auch in unseren Versuchen festgestellte, wichtige Eigenschaft der Wärmedämmung zur Reduzierung von Temperaturstress im Wurzelbereich ist mit einem Anteil von unter 5 % kaum beachtet. Besonders im Hinblick auf die maßgebliche Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen in dichten, heißen urbanen Räumen, ist es überraschend, dass dieser Aspekt nicht stärker berücksichtigt, ist in der Pflanzgefäßherstellung.

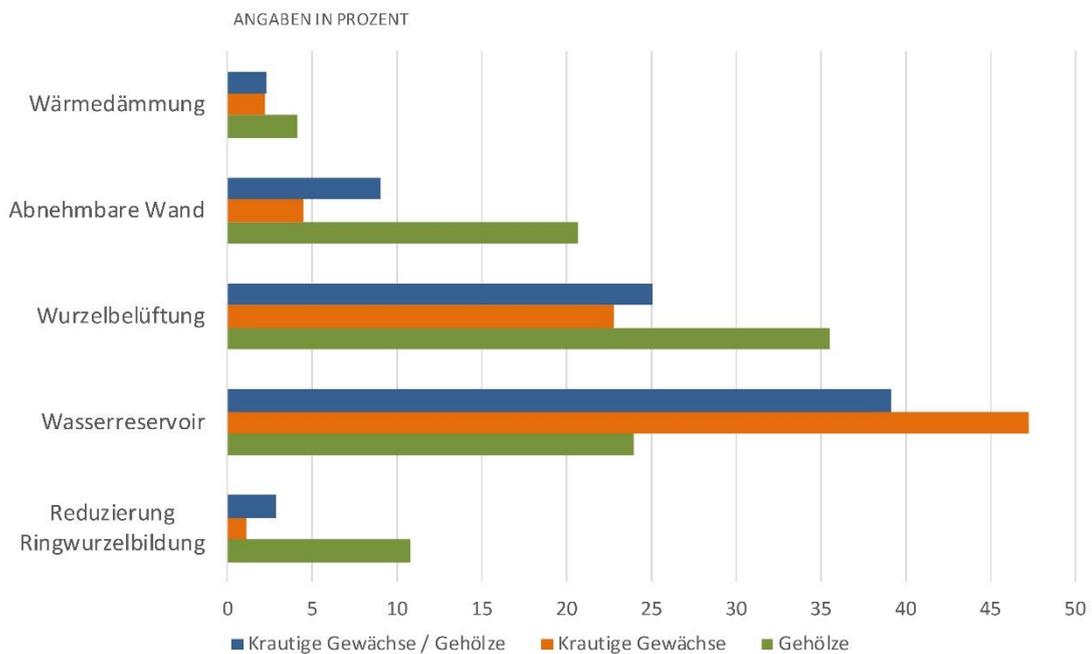


Abbildung 69. Prozentualer Anteil von vitalitätsfördernder Pflanzgefäß Eigenschaften in den ausgewerteten Patenten. Aufgeschlüsselt nach Zielgruppen: Krautige Gewächse / Gehölze (Blau), Krautige Gewächse (Orange) und Gehölze (Grün).

Aus der Patentrecherche wird auch deutlich, dass der Großteil der Pflanzgefäße keine vitalitätsfördernde Eigenschaft besitzt. Es wurde auch kein Pflanzgefäß gefunden, das alle fünf als relevant eingestufte Eigenschaft kombiniert. Die Eigenschaft der abnehmbaren Wand ist ein technisches Mittel der Zeitlichkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen gezielt durch manuelle Wurzelpflege entgegenzuwirken. Die meisten Pflanzgefäße, die über diese Eigenschaft verfügen, sind jedoch primär für die Anzucht und den Transport von Bäumen konzipiert und weniger für eine dauerhafte Bepflanzung. Aus unseren bisherigen Forschungserkenntnissen wird deutlich, dass jedes Pflanzgefäß nur einen limitierten Wurzelraum zur Verfügung stellen kann und somit eine absehbare Endlichkeit für den Baum darstellt. Die daraus resultierende Zeitlichkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen kann nicht rein technisch gelöst werden, dazu benötigt es zeitliche Konzepte.

5.3 Datenbank von Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen

In der Recherche nach Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen, gebaut zwischen 1970 und 1990 in Bayern, wurden kaum Projekte im öffentlichen Freiraum, sondern hauptsächlich nur Gebäude gefunden. Da die Stichprobe für Projekte in Bayern in diesem Zeitraum sehr begrenzt ausfiel, wurde die Suche geographisch erweitert. In Tabelle 14 sind die gefundenen Projekte aufgelistet.

Tabelle 14. Liste von Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen mit Baujahr zwischen 1970 und 1990.

Projekt	Ort	Baujahr	Pflanzgefäßgröße	Räumlicher Kontext
Olympisches Dorf Bungalows	München	1972	ca. 2500 Liter	Öffentlicher Freiraum
Pharaohaus	München	1974		Gebäude
Fuchsbau	München	1973		Gebäude
Olympisches Dorf	München	1972		Gebäude
Baumhaus	Darmstadt	1972	ca. 15.000 Liter	Gebäude
Terrassenhaus St. Peter	Graz	1978		Gebäude
Hundertwasserhaus	Wien	1985	ca. 1.000 Liter	Gebäude
Wohnpark Alterlaa	Wien	1985		Gebäude

Insgesamt konnten acht Projekte identifiziert werden, die Bäume in Pflanzgefäßen verwenden und zwischen 1970 und 1990 gebaut wurden. Dabei konnte mit den Bungalows im Olympischen Dorf München nur ein Projekt im öffentlichen Freiraum identifiziert werden. Dem gegenüber stehen sieben Projekte an Gebäuden. Ein Grund kann für diesen signifikanten Unterschied in der Projektzahl der Umstand sein, dass viele öffentliche Freiräume, die in der genannten Zeit gebaut wurden, mittlerweile renoviert und/oder umgestaltet wurden und somit nicht mehr gefunden werden können.

Zu den Projekten Olympisches Dorf Bungalows, München, Baumhaus in Darmstadt und Hundertwasserhaus Wien konnten detaillierte Angaben zur Standzeit der Bäume und der Pflanzgefäßgröße ermittelt werden.

Die Bäume in Pflanzgefäßen im Olympischen Dorf Bungalows waren in Betonringe mit Erdanschluss gepflanzt. Da der Baugrund zu stark verdichtet war, dass die Bäume in das angrenzende Erdreich wurzeln konnten, bildete diese Art der Pflanzung einen so genannten Blumentopfeffekt [24]. Die Bäume wurden im Rahmen der Renovierung des Freiraums im Jahr 2008 entfernt und durch Neupflanzungen ersetzt. Bei der Entfernung der Bestandbäume wurde der beschriebene Blumentopfeffekt entdeckt (Keller, Regine, pers. Komm., 04.03.2024). Die Bäume wuchsen somit von der Baufertigstellung im Jahr 1972 bis zur Renovierung im Jahr 2008 insgesamt 36 Jahre in Pflanzgefäßen. Die Pflanzgefäße verfügten ungefähr über ein Volumen von 2500 Liter. Aufgrund der guten Pflege, besonders die Bewässerung, durch die Bewohner der Bungalows waren die Bäume zum Zeitpunkt der Entfernung noch vital und wiesen je nach Baumart Kronendurchmesser von ca. 2 – 4 m auf. Die Bäume an der Fassade des Hundertwasserhauses in Wien wurden ca. 1985 gepflanzt und bis auf zwei, die vor ca. zehn Jahren ausgetauscht wurden, sind alle noch vital (Truppe, Doris, pers. Komm., 06.03.2024). Die Bäume an der Fassade verfügen über mindestens 1000 Liter Wurzelraum und Kronendurchmesser von ca. 2 – 4 m je nach Baumart und Pflanzgefäßgröße. Die Bäume wachsen somit seit 39 Jahren an der Fassade des Hundertwasserhauses.

Das Baumhaus in Darmstadt wurde 1972 fertiggestellt und ca. 1975 wurden die Bäume auf die Dachterrasse gepflanzt (Hoffmann, Till und Hoffmann, Pan, pers. Komm., 23.03.2024). Das integrierte Pflanzgefäß umfasst ein Volumen von ca. 15.000 Liter und war mit sechs Kiefern bepflanzt. Dies entspricht ca. 2.500 Liter pro Baum, jedoch ist in einem großen gemeinschaftlich genutzten Pflanzgefäß der verfügbare Wurzelraum pro Baum höher einzuschätzen, als das errechnete Volumen [18]. Die Kiefern erreichten eine Höhe von etwa

sechs Metern und einen Kronendurchmesser von ca. drei bis vier Metern (Hoffmann, Till und Hoffmann, Pan, pers. Komm., 23.03.2024). Im Jahr 2017 kam in der Bewässerungsanlage jedoch zu einem Rohrbruch, der nicht schnell genug behoben werden konnte, somit sind die Kiefern in dem Jahr vertrocknet. Bis zu ihrem Tod wuchsen die Kiefern ca. 42 Jahre vital im Pflanzgefäß. Die Kiefern wurden durch fünf Kupferfelsenbirnen ersetzt.

Auch wenn hier nur eine kleine Stichprobe an älteren Projekten mit Bäumen in Pflanzgefäßen präsentiert werden konnte, zeigt diese, dass eine Lebensdauer von 40 Jahren für Bäume in Pflanzgefäßen realistisch ist. Die beschriebenen Projekte verdeutlichen, welche wichtige Rolle die Pflege, besonders die Bewässerung, bei Bäumen in Pflanzgefäßen spielt. Ist diese nicht gegeben, ist die ermittelte Lebensdauer von ca. 40 Jahren nicht zu erreichen. Wie fragil das System Baum im Pflanzgefäß ist, veranschaulicht das Baumhaus in Darmstadt. Trotz eines großzügig bemessenen Pflanzgefäßes reichte ein langwieriger Defekt in der Bewässerung, dass die Kiefern vertrockneten. Die aus dieser Analyse gewonnenen Erkenntnisse zur Lebensdauer von Bäumen in Pflanzgefäßen, decken sich mit den Angaben aus den Experteninterviews (vgl. Fleckenstein et al. (Artikel in Review)).

5.4 Zeitabhängige Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen

Im Folgenden stellen wir die entwickelte zeitabhängige Entwurfstypologie für Bäume in Pflanzgefäßen vor. Die Typologie umfasst 13 Kerntypen für die Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen, die durch fünf Entwurfsparameter charakterisiert werden können, darunter der zeitliche Rahmen des Projekts, der räumliche Kontext, der Baum, das Pflanzgefäß und der lokale Einfluss. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die 13 Typen und welche Entwurfsparameter sie erfüllen. Mit Hilfe von Tabelle 15 kann man feststellen, welcher Typ für das eigene Projekt geeignet ist. „X“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als vollständig geeignet für den Entwurfsparameter. „0“ 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 Entwurfsparameter nicht auf den zeitabhängigen Typ zutrifft.

Der Projektzeitraum beschreibt die voraussichtliche Dauer des Projekts. Diese kann entweder temporär sein, zwischen einigen Wochen und bis zu zehn Jahren, oder permanent mit einer Dauer von zehn Jahren und mehr. Die Unterscheidung zwischen temporär und dauerhaft wird bei der Zehn-Jahres-Marke angesetzt, da dies die Zeitspanne ist, die ein Baum laut unseren Experteninterviews in einem Pflanzgefäß mit der Möglichkeit der anschließenden Verpflanzung verbringen 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. Die vorübergehende Nutzung eines Baumes in einem Pflanzgefäß kann zwischen einigen Wochen und zehn Jahren liegen. Eine dauerhafte Nutzungsdauer beträgt mindestens zehn Jahre oder mehr. „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 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 ist. Der Parameter „Lokaler Einfluss“ gibt an, ob die Art der Bepflanzung räumliche und mikroklimatische Auswirkungen hat und ob die Auswirkungen tendenziell unmittelbar oder langfristig sind. „Unmittelbarer Einfluss“ bedeutet, dass der zeitbasierte 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“ beschreibt, dass sich der Baum in den ersten drei bis fünf Jahren etablieren muss, bevor seine Wirkung voll spürbar ist.

Tabelle 15. Übersicht der 13 identifizierten Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen und für welchen Entwurfparameter sie gelten. „X“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als vollständig geeignet für den Entwurfparameter. „0“ kennzeichnet einen zeitabhängigen Typ als geeignet mit technischen Anpassungen, z. B. wenn er auf dem Dach oder an der Fassade platziert werden soll. „-“ kennzeichnet, dass der Entwurfparameter nicht auf den zeitabhängigen Typ zutrifft.

Entwurfparameter	Standard	Chasmophyt	Bonsai	Pflanzgefäßgesellschaft	Ausdehnen	Ausdünnen	Überschneiden	Lückenfüllen	Baumverleih	Baumtausch	Baumzwischenutzung	Baumzwischenlagerung	Baumfassade
1. Projektzeitraum													
Permanent	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	-	X
Temporär	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-
2. Räumlicher Kontext													
Freiraum	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-
Gebäude	0	0	0	0	-	-	-	-	-	0	0	-	X
3. Baum													
Permanent	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	X
Temporär	-	-	-	-	-	0	0	0	X	X	X	X	-
Verpflanzung	-	-	0	-	-	0	0	0	X	X	X	X	-
4. Pflanzgefäß													
Permanent	X	X	0	X	X	X	X	X	-	X	X	-	X
Temporär	-	-	X	-	-	0	0	0	X	0	0	X	-
Mobil	0	0	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	-
Unbeweglich	0	0	-	X	-	0	-	-	-	-	0	-	X
Wiederverwendung	-	-	0	-	-	0	0	0	X	X	X	X	-
5. Lokaler Einfluss													
Unmittelbar	0	-	-	0	X	X	X	X	X	X	X	X	0
Langfristig	X	X	X	X	X	X	X	X	-	0	0	-	X

5.4.1 Zeitabhängige Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäßen

Die entwickelten zeitabhängigen Entwurfstypen sind im Leitfaden für Bäume in Pflanzgefäße detailliert präsentiert und können dort nachgeschaut werden. Daher präsentieren wir hier nur ein paar ausgesuchte Beispiele der zeitabhängigen Entwurfstypen.

Standard

Der Typ "Standard" (Abbildung 70) 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.

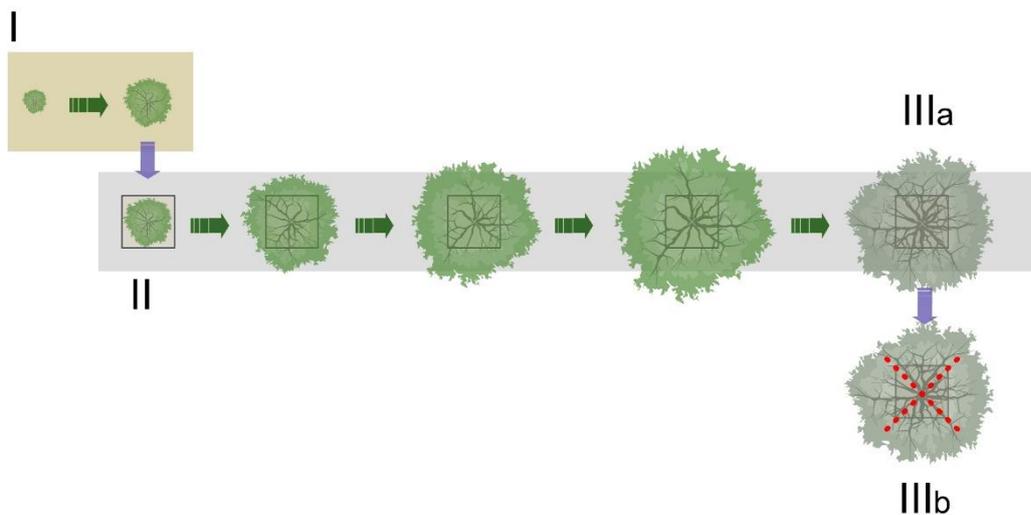


Abbildung 70. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Standard". I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in die Pflanzgefäße auf dem Projektgelände, Baum beginnt im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: Absterben des Baumes oder Ende des Projektzeitraums, Entfernung von Baum und Pflanzgefäß vom Projektgelände; IIIb: Entsorgung von Baum und Pflanzgefäß.

Pflanzgefäßgesellschaft

Beim Typ "Pflanzgefäßgesellschaft" (Abbildung 71) 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.

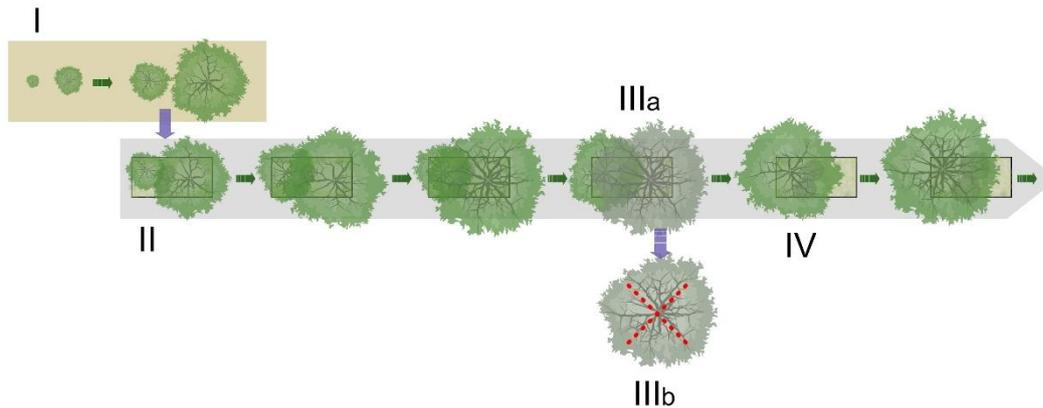


Abbildung 71. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Pflanzgefäßgesellschaft". I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in die Pflanzgefäße am Projektstandort, Bäume beginnen im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: im Falle des Absterbens eines Baumes Entfernung des toten Baumes aus dem Pflanzgefäß, gesunder Baum wächst im Pflanzgefäß weiter; IIIb: Entsorgung des toten Baumes.

Ausdünnen

Beim Typ "Ausdünnen" (Abbildung 72) 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.

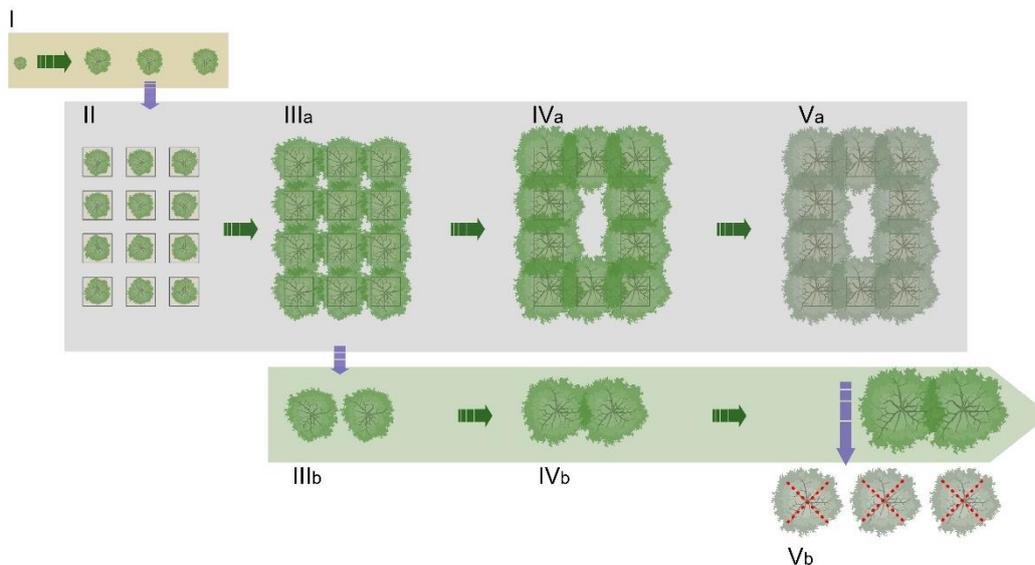


Abbildung 72. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Ausdünnen". I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in Pflanzgefäße auf dem Projektgelände, Bäume beginnen im Pflanzgefäß zu wachsen; IIIa: Vergrößerung der Baumkronen, Entfernung von zu dichten Bäumen; IIIb: Verpflanzung der entfernten 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.

Baumverleih

Mietbäume (Abbildung 73) können eine sehr ästhetische Gestaltungslösung für Veranstaltungen sein. Die Bäume werden von der Baumschule in Pflanzkübel 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.

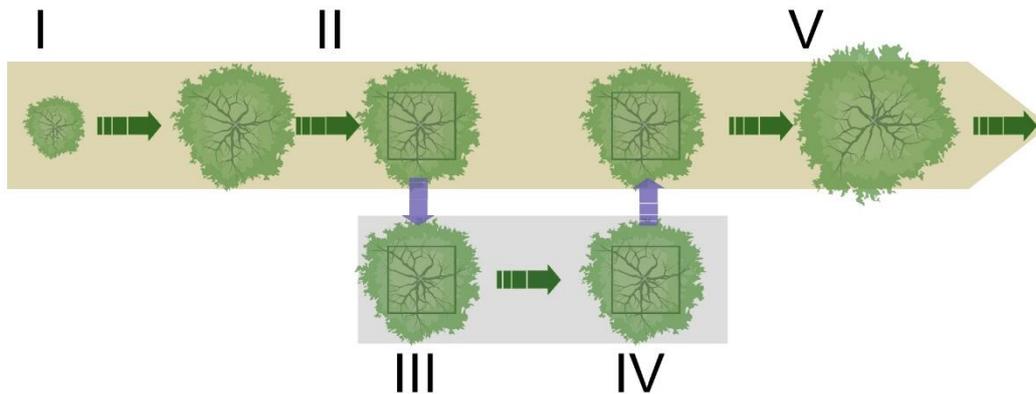


Abbildung 73. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Baumverleih". I: Anzucht des Baumes in der Baumschule; II: Einpflanzen des Baumes in eine Pflanzschale in der Baumschule; III: Vermietung des Baumes in der Pflanzschale und Transport zum Veranstaltungsort; IV: Veranstaltung beendet, Baum in der Pflanzschale wird abgeholt und zurück zur Baumschule transportiert; V: Entnahme des Baumes aus der Pflanzschale zur weiteren Anzucht in der Baumschule.

Baumfassade

Baumfassaden werden durch die Anpflanzung von Bäumen so nah wie möglich an der Gebäudefassade auf mehreren Ebenen geschaffen. Bei diesem Typ (Abbildung 74) 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 entfernten Bäume an andere Standorte zu verpflanzen, die auf den unteren Geschossen gewachsen sind. Bei Bäumen in Pflanzgefäßen auf den höheren Geschossen könnte die Wurzelverformung bereits zu weit fortgeschritten sein, um eine erfolgreiche Verpflanzung zu ermöglichen.

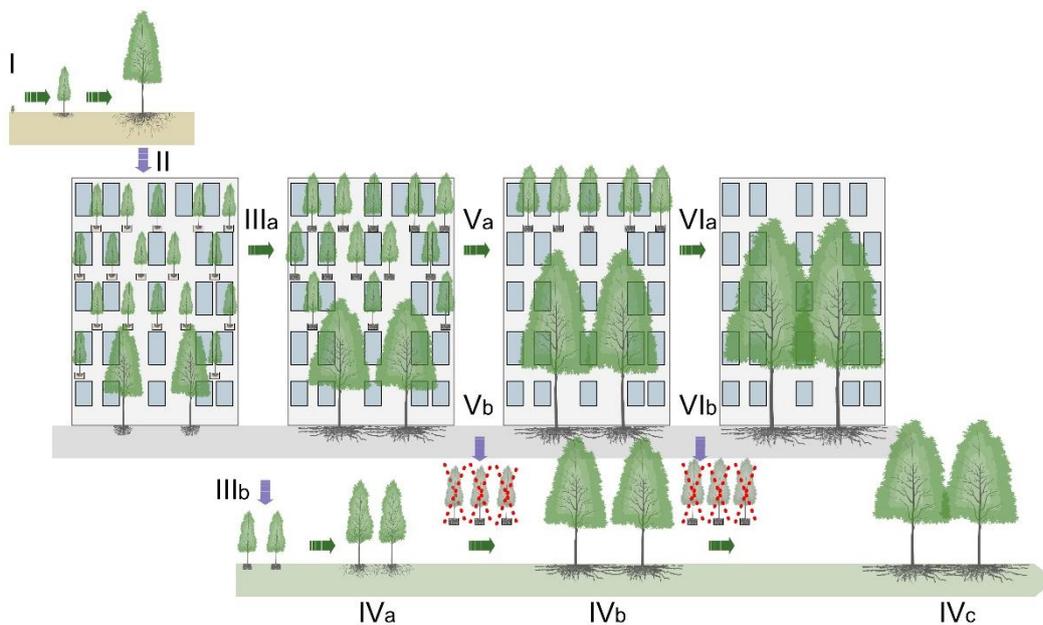


Abbildung 74. Zeitdiagramm des Entwurfstyps "Baumfassade". I: Anzucht von Bäumen in der Baumschule; II: Einpflanzen von Bäumen in den Boden und in Pflanzgefäße an der Fassade am Projektstandort, Bäume beginnen zu wachsen; IIIa: Vergrößerung der Baumkronen, Überlappung der Baumkronen von Bäumen im Boden 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 an; 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.

5.5 Entwicklung Beispielenwürfe

Im Rahmen der Entwurfsseminare „Trees in Planters – Designing with Growth Processes“ für Studierende der Studiengänge Landschaftsarchitektur und -planung (Bachelor), Landschaftsarchitektur (Master) und Architektur (Master) wurden insgesamt 13 Beispielenwürfe an Potentialorten für die Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen erarbeitet.

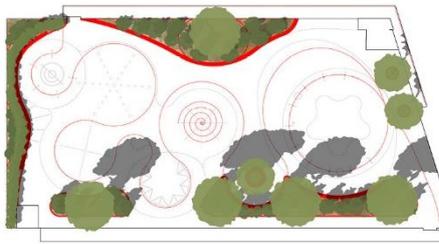
5.5.1 Beispielenwürfe Entwurfsseminar 1

Das Entwurfsseminar I "Trees in Planters – Designing with Growth Processes" fand im Sommersemester 2022 statt, an dem zehn Studierende teilnahmen und fünf Entwurfsteams bildeten. Die Aufgabe bestand darin, ein plausibles Gestaltungskonzept zu entwickeln, das die Lebensqualität eines Ortes durch die Nutzung des Potenzials von Bäumen in Pflanzgefäßen verbessert. Tabelle 16 listet die von den Studenten ausgewählten Projekte und Orte auf, gibt eine kurze Beschreibung der Ziele, die die Studenten mit ihrem Gestaltungskonzept erreichen wollten, und enthält den Zeitrahmen des Projekts sowie den räumlichen Kontext des Ortes. Abbildung 75 gibt einen Überblick über die grafische Darstellung der Gestaltungskonzepte. Im Folgenden werden die Arbeiten der Studenten kurz beschrieben.

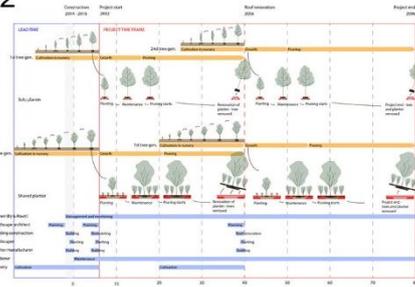
Tabelle 16. Übersicht über die Beispielenwürfe des Entwurfsseminars 1

	Ort / Projekt	Studierende	Ziel	Projektzeitraum	Räumlicher Kontext
A	Konditage Lüders, Kopenhagen, Dänemark	Linnéa Lundström, Anastasiia Durova	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an schattigen Plätzen	Lebensdauer Gebäude, 80 Jahre	Dachgarten, öffentlicher Freiraum
B	Neupfarrplatz Regensburg	Yuechen Ning, Ziyue Chen	Reduktion der Hitzebelastung	40 Jahre	Platz, öffentlicher Freiraum
C	Marktplatz Stuttgart	Lei Su, Yinuo Chen	Multifunktionaler öffentlicher Freiraum, Reduktion der Hitzebelastung	30 Jahre	Platz, öffentlicher Freiraum
D	Theresienwiese München	Vincent Wenk, Amelina Brandes, Leo Kiermeier	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an schattigen Plätzen, Reduktion der Hitzebelastung	30 – 50 Jahre	Großflächiger öffentlicher Freiraum
E	Urbane öffentliche Freiräume	Juan Barragan	flexible Begrünlungslösungen	1 – 5 Jahre	Urbane öffentliche Freiräume

A1



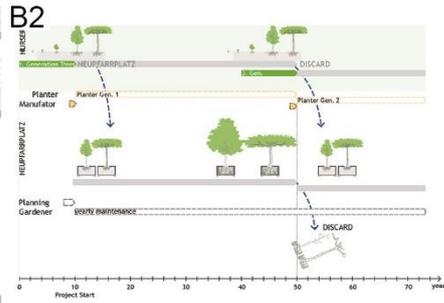
A2



B1



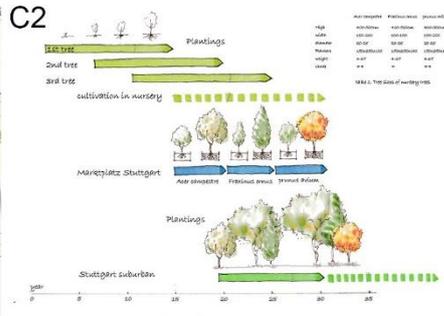
B2



C1



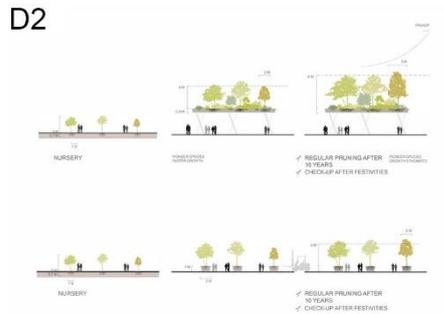
C2



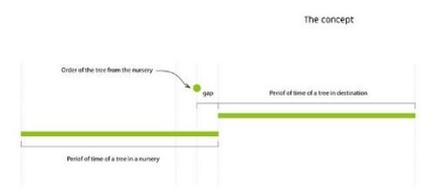
D1



D2



E1



E2

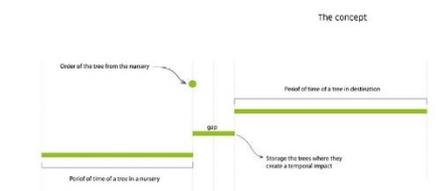


Abbildung 75. Überblick der Beispielenwürfe des Entwurfsseminars 1. Die Buchstaben in der Abbildung und Tabelle 16 stehen für das gleiche Studierendenteam.

Die Studierendenarbeit A von Linnéa Lundström und Anastasiia Durova befasst sich mit dem Spielplatz auf dem Dach des Parkhauses Konditage Lüders in Kopenhagen. Der Spielplatz wird nur von niedrigeren Blumenbeeten eingrahmt und bietet den Nutzern an heißen Sommertagen keine schattigen Bereiche. Das Konzept zielt darauf ab, die Aufenthaltsqualität

zu verbessern, indem schattige Bereiche für die Nutzer des Spielplatzes angeboten werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die bestehenden Blumenbeete durch größere Pflanzkübel ersetzt, die genügend Boden und Wurzelraum für Bäume bieten. Die Bäume werden von Sträuchern umgeben sein, um Windschutz zu bieten. In den großen Pflanzgefäßen wird sich also eine Pflanzengemeinschaft bilden. Falls ein Baum oder ein Strauch entfernt werden muss, bevor eine Renovierung der Pflanzgefäße oder des Daches erforderlich ist, können die verbleibenden Pflanzen in die Lücke hineinwachsen und den Verlust der Pflanzen ausgleichen.

Die Studierendenarbeit B von Yuechen Ning und Ziyue Chen befasst sich mit dem sehr begrenzten Wurzelraum und dem Bedarf an Flexibilität, da der Neupfarrplatz in Regensburg durch einen Wochenmarkt und als Veranstaltungsort in der Innenstadt genutzt wird. Um das Ziel der Hitzereduzierung auf dem Platz zu erreichen, werden Bäume in Pflanzgefäßen zur Beschattung und Kühlung eingesetzt. Die Verwendung von Platanen (*Platanus x hispanica*) mit einer Schirmkrone ermöglicht einen vergrößerten Schattenbereich unterhalb des Baumes. Das Entwurfskonzept sieht vor, die Bäume und Pflanzgefäße nach einer angenommenen maximalen Lebensdauer von 40 Jahren zu entfernen.

Die Studierendenarbeit C von Lei Su und Yinuo Chen steht vor der Herausforderung, dass der verfügbare Wurzelraum aufgrund eines unterirdischen Luftschutzbunkers auf dem Stuttgarter Marktplatz sehr begrenzt ist. Ziel ist es, einen multifunktionalen Freiraum zu schaffen, der eine flexible Nutzung ermöglicht und gleichzeitig den Platz mit Bäumen beschattet, um den Nutzern Kühlung zu verschaffen. Um diese Ziele zu erreichen, werden Bäume in mobilen Pflanzgefäßen eingesetzt. Ein regelmäßiger Baumaustausch alle fünf Jahre sorgt dafür, dass die Bäume in die umliegenden Grünflächen und Wälder Stuttgarts verpflanzt werden können. Dieses Konzept ermöglicht alle fünf Jahre einen Wechsel der Baumarten und damit eine Veränderung der Ästhetik des Platzes.

Die Studierendenarbeit D von Amelina Brandes, Vincent Wenk und Leon Kiermeier stellt sich den vielfältigen Herausforderungen der Theresienwiese in München. Die Theresienwiese wird von mehreren großen Freiluftveranstaltungen genutzt, am bekanntesten ist das Oktoberfest. Zwischen diesen Veranstaltungen nutzen die Menschen aus der Nachbarschaft den öffentlichen Raum zum Skaten, Kiten, Laufen, Treffen, Kontakte knüpfen und vieles mehr. Der Mangel an Bäumen in Verbindung mit der versiegelten Fläche der Theresienwiese führt an heißen Sommertagen zu einer erhöhten Hitzebelastung, die auch die umliegende Nachbarschaft betrifft. Das Konzept zielt auf die Aufenthaltsqualität und die Reduzierung der Hitzebelastung des Platzes durch Beschattung. Das Konzept berücksichtigt die räumlichen Anforderungen von Veranstaltungen, indem es Bäume in beweglichen Pflanzgefäßen auf dem Boden mit Bäumen in Pflanzgefäßen auf einer Plattform auf Säulen kombiniert und gleichzeitig die erforderliche Beschattung und Kühlung bietet.

Die Studierendenarbeit E von Juan Barragan zielt auf städtische Freiräume ab, die sich durch eine hohe zeitliche Flexibilität und eine intensive, aber ständig wechselnde Nutzung auszeichnen. Darüber hinaus hat Juan Barragan eine zeitliche Lücke zwischen der Bestellung eines Baumes in einer Baumschule, seinem Transport und der Pflanzung am Bestimmungsort festgestellt. Daher werden die Bäume bestellt und geliefert, wenn sie verfügbar sind, aber vor dem Zeitplan für ihre endgültige Anpflanzung. Somit wird der Baum in zwei Projekten in derselben Stadt verwendet. Dieses Konzept löst zum einen das Problem, dass der Baum zu früh oder zu spät an die Baustelle geliefert wird und die gewünschte Baumart nicht zur Verfügung steht, und zum anderen sorgt es für Abkühlung und eine Verbesserung der Lebensqualität an Orten, an denen normalerweise keine Bäume gepflanzt würden.

5.5.2 Beispielentwürfe Entwurfsseminar 2

Im Wintersemester 2022/23 fand das Entwurfsseminar II "Bäume in Pflanzgefäßen II - Gestalten mit Wachstumsprozessen" statt, an dem zwölf Studierende teilnahmen, die acht Entwurfsteams bildeten. Die Aufgabe bestand darin, ein plausibles Gestaltungskonzept zur Verbesserung der Lebensqualität des Ortes durch die Nutzung des Potenzials von Bäumen in Pflanzgefäßen zu entwickeln. Tabelle 17 listet die von den Studenten ausgewählten Projekte und Orte auf, gibt eine kurze Beschreibung der von den Studenten angestrebten Gestaltungskonzepte und enthält den Zeitrahmen des Projekts sowie den räumlichen Kontext des Ortes. Abbildung 76 und Abbildung 77 geben einen Überblick über die grafische Darstellung der Gestaltungskonzepte. Im Folgenden geben wir kurze Beschreibungen der Arbeiten der Studierenden.

Tabelle 17. Übersicht über die Beispielentwürfe des Entwurfsseminars 2

	Ort / Projekt	Studierende	Ziel	Projektzeit- raum	Räumlicher Kontext
A	Sechseläuten- platz, Zurich	Alina Levin, Kiyomi Langenhagen	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an, Reduktion der Hitzebelastung, multifunktional	30 Jahre	Platz, öffentlicher Freiraum
B	Naturwissen- schaftliches Zentrum, Freising	Andrea Albalate Pérez, Aida Domingo Losa	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an schattigen Plätzen, Reduktion der Hitzebelastung	15 – 45 Jahre	Campus, öffentlicher Freiraum
C	Neuhauser Street, Munich	Mojca Kaizer, Nico Kaczmarek	Reduktion der Hitzebelastung	30 Jahre	Fußgängerzone
D	Hafeninsel, Stralsund	Linn Jochum, Philipp Endisch	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an schattigen Plätzen	30 Jahre	Öffentlicher Freiraum
E	Piece Hall, Halifax	Jinming Yu, Jakob Autenrieth	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an schattigen Plätzen	32 Jahre	Innenhof, öffentlicher Freiraum
F	Volksfestplatz, Nuremberg	Alina Scheubeck, Naemi Reng	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an schattigen Plätzen, Erhöhung der Biodiversität	40 Jahre	Öffentlicher Park
G	Theresien- höhe, Munich	Tatiana Villaroel Westerbarkey	Verbesserung der Aufenthaltsqualität, Angebot an schattigen Plätzen, Reduktion der Hitzebelastung	50 Jahre	Öffentlicher Park
H	Urbane Fassadenbegrü- ung	Juan Barragan	Flexible Begrünungslösungen	1 – 3 Jahre	Fassaden, urbane öffentliche Freiräume

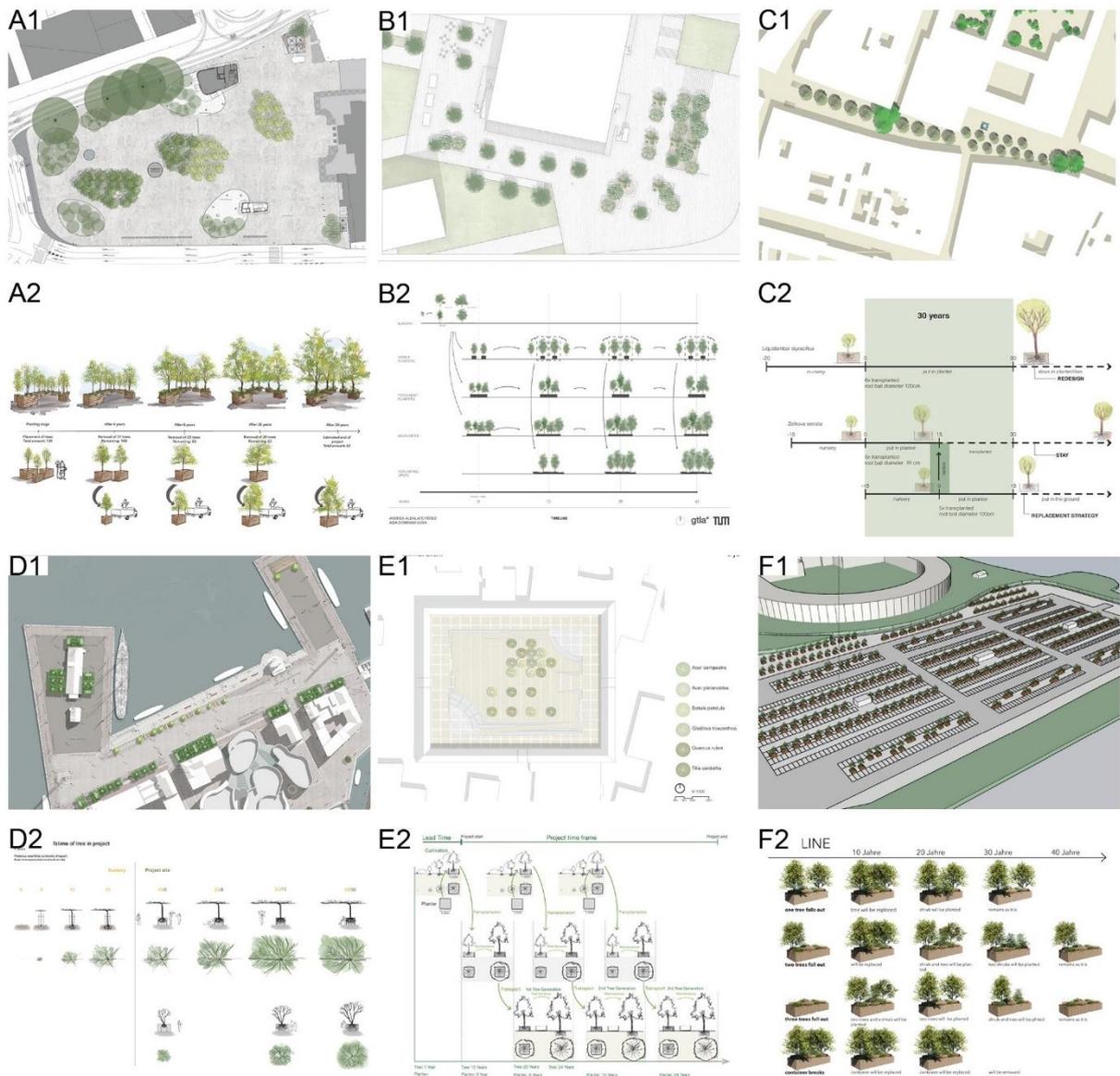


Abbildung 76. Überblick Teil 1 der Beispielentwürfe des Entwurfsseminars 2. Die Buchstaben in der Abbildung und Tabelle 17 stehen für das gleiche Studierendenteam.

Die Studierendenarbeit A von Alina Levin und Kiyomi Langenhagen befasst sich mit dem fehlenden unterirdischen Wurzelraum aufgrund einer Tiefgarage und dem hohen Anteil an versiegelter Fläche auf dem Sechseläutenplatz in Zürich. Ihr Konzept verwendet Bäume in beweglichen Pflanzgefäßen unterschiedlicher Größe, um auch mit kleinen Bäumen schattige Plätze anbieten zu können. Je grösser die Bäume werden, desto weniger Bäume werden benötigt, um die gleiche Fläche zu beschatten. Das Gestaltungskonzept sieht vor, die Bäume in kleinen Pflanzgefäßen in die umliegenden Grünflächen des Sechseläutenplatzes zu verpflanzen. Diese Massnahme wird während der Projektlaufzeit von rund 30 Jahren zweimal durchgeführt. Damit wird eine unmittelbare Beschattung und ästhetische Wirkung erzielt und den Besuchern des Sechseläutenplatzes neue Räume mit Aufenthaltsqualität geboten.

Die studentische Arbeit B von Andrea Albalate Pérez und Aida Domingo Losa zielt auf den vollständig versiegelten Platz vor einem Neubau auf dem Universitätscampus in Freising. Der Platz verfügt derzeit über keine Elemente, die Aufenthaltsqualität für Besucher bieten. Die fehlende Beschattung durch Bäume kann an heißen Sommertagen zu einer Überhitzung des Platzes führen. Das Konzept bezieht die neu gepflanzten Bäume am Rande des Platzes mit

ein und kombiniert sie mit weiteren Bäumen in Pflanzkübeln auf dem Platz, um den kurzfristigen Bedarf an zusätzlichen schattigen Bereichen zu decken. Wenn die Bäume im Boden so weit ausgereift sind, dass sie dem Platz ausreichend Schatten spenden, werden die Bäume in den Pflanzgefäßen auf die umliegenden Grünflächen des Campus verpflanzt. Bäume in großen Pflanzkübeln ergänzen das Konzept und machen einen großen Teil des Platzes nutzbar. Die Pflanzkübel werden durch Bänke ergänzt, um den Besuchern die Möglichkeit zum Verweilen zu geben.

Die Studierenden C, von Mojca Kaizer und Nico Kaczmarek, stellt sich dem Bedürfnis nach Abkühlung an heißen Sommertagen in der Fußgängerzone der Neuhauser Straße in München. Die dichte Belegung des Untergrunds durch verschiedene kritische Infrastrukturen verhindert die Anpflanzung von Bäumen im Boden. Das Konzept verwendet daher kleinere Bäume in beweglichen Pflanzgefäßen, wenn eine flexible räumliche Lösung erforderlich ist, und, wo möglich, größere stationäre Pflanzgefäße, die ein größeres Wachstum der Bäume ermöglichen. Durch diese Kombination verschiedener Baumgrößen und Pflanzgefäßtypen wird die größtmögliche beschattete Fläche erreicht.

Die studentische Arbeit D von Linn Jochum und Philipp Endisch befasst sich mit dem Mangel an Schatten und unterirdischem Wurzelraum entlang der Wasserfront der Hafeninsel Stralsund. Das Konzept ist zweigeteilt, wobei Bäume in Pflanzgefäßen hinzugefügt werden, um schattige Bereiche auf der Hafeninsel an bestimmten Stellen zu schaffen, und die Sonnenschirme der Restaurants entlang des Ufers durch schirmförmige Bäume in Pflanzgefäßen ersetzt werden. Die Größe der Pflanzgefäße und der Bäume wird zum Zeitpunkt der Anpflanzung so gewählt, dass die Lebensdauer der Bäume und Gefäße auf 30 Jahre geschätzt wird. Die Bäume und Pflanzgefäße sollen nur dann entfernt und entsorgt werden, wenn sie nach dem vorgesehenen Zeitraum nicht mehr in einem vitalen Zustand sind.

Der Beispielenwurf E von Jinming Yu und Jakob Autenrieth befasst sich mit den hochgradig versiegelten Oberflächen des Innenhofs der Piece Hall in Halifax, England, mit seiner flexiblen Nutzung für Veranstaltungen und Märkte sowie mit dem Erbe des Ortes. Der Hof kann nur durch Tore betreten werden, was die Größe der Pflanzen und Bäume einschränkt, die verwendet werden können. Das Konzept verwendet bewegliche Pflanzgefäße, um der Forderung nach einer flexiblen räumlichen Nutzung des Innenhofs nachzukommen. Die Bäume werden alle acht Jahre ausgetauscht und in einen Park verpflanzt, wodurch die Flexibilität des Raums durch den Wechsel der Baumarten widerspiegelt wird. Das Konzept ist an die durch die Größe der Hofeinfahrten erzwungene Größenbeschränkung angepasst, spendet aber gleichzeitig den notwendigen Schatten und verbessert die Aufenthaltsqualität.

Der Beispielenwurf F von Alina Scheubeck und Naemi Reng zielt auf die große Leere des Volksfestplatzes in Nürnberg mit dem Ziel ab, seine Artenvielfalt zu erhöhen und gleichzeitig den Bedarf an einem großen Platz für das jährliche Nürnberger Volksfest zu decken. Die Verwendung von 20 Fuß langen Containern als Pflanzgefäße ermöglicht eine Vielfalt von Strauch- und Baumarten, die nicht nur die Aufenthaltsqualität für Menschen erhöht, sondern auch Mikrobiotop-Möglichkeiten für Wildtiere bietet. Die Konstruktion der 20-Fuß-Container bietet die Möglichkeit, die Pflanzgefäße bei Bedarf zu versetzen. Das Konzept stellt eine langfristige Lösung zur Erhöhung der Artenvielfalt und der Aufenthaltsqualität dar, indem eine vielfältige Pflanzengemeinschaft in großen Pflanzgefäßen etabliert wird.

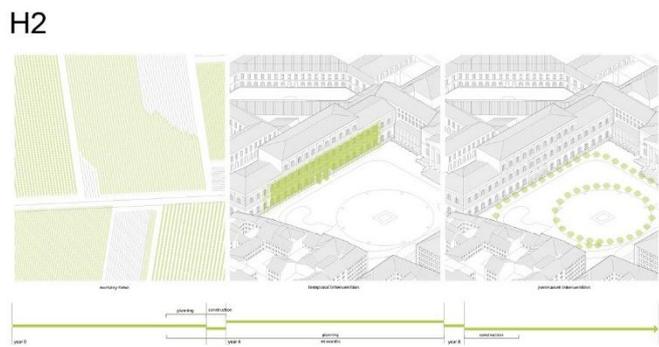
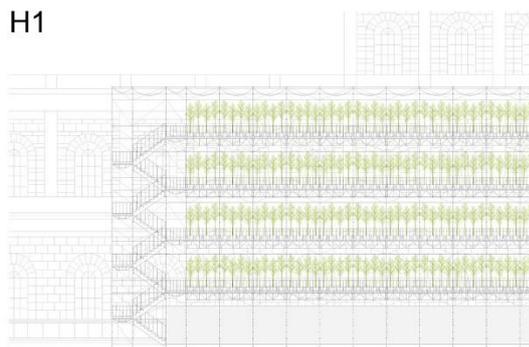
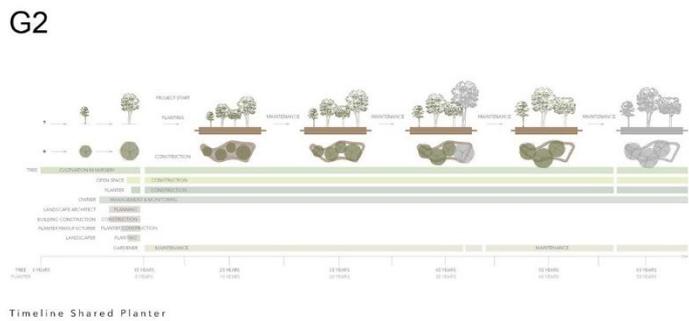


Abbildung 77. Überblick Teil 2 der Beispielentwürfe des Entwurfsseminars 2. Die Buchstaben in der Abbildung und Tabelle 17 stehen für das gleiche Studierendenteam.

Die Studierendenarbeit G von Tatiana Villaroel Westerbarkey befasst sich mit der Herausforderung hochgradig versiegelter Flächen, denen es an Bäumen und Aufenthaltsqualität im bestehenden Park der Theresienhöhe in München mangelt. Der Park befindet sich auf einem Eisenbahntunnel und bietet weder Boden noch Wurzelraum für Bäume. Mehrere Bäume in großen Pflanzgefäßen in der zentralen Achse des Parks passen sich der vorhandenen Gestaltung und den Strukturen an und bieten gleichzeitig die notwendigen schattigen Bereiche für Spiel und Aufenthalt. Bäume in kleinen Pflanzgefäßen an den Rändern des Parks ergänzen die Bäume in den großen Pflanzgefäßen und verbinden die zentrale Achse des Parks mit dem umliegenden Viertel. Die Bäume in den einzelnen Pflanzgefäßen sollen alle fünf Jahre ausgetauscht und in die umliegenden Grünflächen verpflanzt werden, während die Bäume in den großen Pflanzgefäßen für die Dauer ihrer Lebensdauer erhalten bleiben sollen.

Der Beispiel H von Juan Barragan zielt auf eine vorübergehende Begrünung von Stadtfassaden durch Bäume in Pflanzgefäßen ab. Dieses Konzept baut auf Juans früherer Arbeit im Entwurfsseminar I auf. Da bei der Restaurierung von Fassaden Gerüste verwendet werden, bieten diese auch die Möglichkeit, eine zusätzliche Schicht kleiner Bäume zu beherbergen. Dies erweitert die räumlichen Möglichkeiten für eine temporäre Begrünung mit Bäumen in Pflanzkübeln in dichten städtischen Räumen unter Nutzung des vertikalen Raums. Daher stellt dieses Konzept eine Lösung dar, um auch Gebäude als Träger von temporären Grünflächen einzubeziehen.

6. Diskussion und Fazit

Die Ergebnisse der Untersuchungen nach vier Vegetationsperioden zeigen, dass ein signifikanter Wachstumsunterschied bei beiden Baumarten und allen Pflanzvarianten zwischen Trockenstress und optimaler Bewässerung gemessen wurde. Dies belegen u. a. die jährlichen Zuwachsraten und die Entwicklung der Blattanzahl.

In den ersten zwei Versuchsjahren 2020 und 2021 zeigten die Messergebnisse einen konträren Trend zu der Annahme, dass Winterlinden im Pflanzgefäß stärker auf Trockenstress mit reduziertem Wachstum sowie kleineren Blättern und einer geringeren Blattanzahl reagieren wird als Platanen im Pflanzgefäß. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass in den ersten Jahren nach der Pflanzung eines Baumes in ein Pflanzgefäß die Wachstumsdynamik der jeweiligen Baumart einen größeren Einfluss auf die Trockenstressreaktion hat als der begrenzte Wurzelraum im Pflanzgefäß. Eine schnellwüchsige Baumart wie Platane durchwurzelt tendenziell den verfügbaren Wurzelraum in einem Pflanzgefäß früher vollständig im Vergleich zu einer langsam wachsenden Baumart wie Winterlinde. Dies führt dazu, dass die schnellwüchsige Baumart früher durch den begrenzten Wurzelraum in einem Pflanzgefäß im Wachstum limitiert wird und somit früher auf Trockenstress reagiert. In unserem Versuch und in den hier präsentierten Messergebnissen lässt sich erkennen, dass ab dem dritten Versuchsjahr 2022 beide Baumarten den verfügbaren Wurzelraum in ihren Pflanzgefäßen durchwurzelt hatten. Dies zeigt sich einerseits in dem reduzierten Zuwachs des Stammdurchmessers sowohl bei Bäumen mit optimaler Bewässerung als auch mit reduzierter Bewässerung im Trockenstress, andererseits sehr deutlich in der reduzierten Blattgröße und -anzahl. Im dritten Versuchsjahr 2022 konnte somit auch die Annahme bestätigt werden, dass Winterlinde sensibler auf Trockenstress reagiert als Platane. Insbesondere durch den Blattabwurf aufgrund der Hitze- und Trockenperiode im Juli 2022 sowie ein deutlich niedrigeres Blattwasserpotential bei Winterlinden in nicht gedämmten Pflanzgefäßen mit Trockenstress können als eindeutige Belege für unsere Annahme bewertet werden. Unsere Ergebnisse aus dem Versuchsjahr 2023 deuten jedoch darauf hin, dass es der Kombination von Trockenheit und Hitze bedarf, um einen deutlichen Unterschied zwischen Platane und Winterlinde in Bezug auf Wasserbedarf und der Reaktion auf Trockenstress beobachten zu können.

Die Untersuchungen der Wurzelstrukturen verdeutlichten die unterschiedliche Wachstumsdynamik von Platane und Winterlinde. Während bei Winterlinden in Pflanzgefäßen noch Substrat zwischen den äußeren Wurzeln zu erkennen war, hatte sich bei Platanen in Pflanzgefäßen schon ein ca. 1 – 1,5 cm starker Wurzelteppich entlang der Gefäßwand gebildet. Diese visuelle Beobachtung spiegelt sich auch in den Ergebnissen zur Wurzelmasse wider. Bei Bäumen im Boden fällt der Unterschied bei der Wurzelmasse zwischen Platanen und Winterlinden noch deutlicher aus als im Pflanzgefäß. Der deutlich höhere Grad der Wurzeldeformierung bei Platanen in Pflanzgefäßen wirkt sich wohl stärker negativ auf das Wachstum aus als bei Winterlinden im Pflanzgefäß, was sehr deutlich anhand des stark reduzierten Zuwachses des Stammdurchmessers im Versuchsjahr 2023 zu erkennen ist.

In den oberirdischen Pflanzgefäßen konnten keine signifikanten Unterschiede in Zuwachs, Blattanzahl, -größe und Wurzelmasse sowie -struktur zwischen dem nicht gedämmten und dem gedämmten Pflanzgefäß festgestellt werden. Dies legt nahe, obwohl das nicht gedämmte Pflanzgefäß in den ersten Versuchsjahren sehr wohl über die kritische Substrattemperaturgrenze von 40° stieg, dass die Wasserversorgung einen deutlich größeren Einfluss auf das Baumwachstum hat als die Substrattemperatur. Die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 mit Pflanzgefäßen mit integrierten Wasserreservoirs unterstreichen diese Annahme.

Die Ergebnisse zum Wachstum spiegeln sich auch den Ergebnissen zur mikroklimatischen Wirksamkeit bezogen auf Kühlleistung und Verschattung von Bäumen in Pflanzgefäßen wider. So weisen die Bäume im Boden höhere Kühlleistungen pro m² Kronenprojektionsfläche sowie eine größere verschattete Fläche aufgrund der größeren Kronenprojektionsfläche auf. Die Bäume in Pflanzgefäße mit optimaler Bewässerung in unserem Versuch zeigten jedoch Verdunstungswerte und somit eine Kühlleistung, die als signifikant für die mikroklimatische Kühlung bewertet werden kann. Auch die erreichte Kronenprojektionsfläche von optimal bewässerten Bäumen in Pflanzgefäßen ist im Verhältnis zur Pflanzgefäßgröße als signifikant für mikroklimatische Kühlung zu bewerten, da sie deutlich über den Bereich des Pflanzgefäßes hinausreicht und somit zusätzliche versiegelte Fläche beschatten und deren Erhitzung reduzieren kann. Bei entsprechender Wahl der Pflanzgefäßgröße können so kühle Plätze an heißen Sommertagen unter der Baumkrone entstehen, die das Potential für einen angenehmen Aufenthaltsort für Menschen haben.

Die Forschungsergebnisse der Best-Concept-Fallstudie zeigen, dass es in der Entwurfs- und Planungspraxis noch große Lücken bezüglich des Wachstums und dem möglichen Ausfall von Bäumen in Pflanzgefäßen gibt. Diese Thematik wird daher oft nicht in den Vegetationskonzepten und im gestalterischen Entwurf aufgegriffen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass zur Problemlösung dieser Frage bislang eher technische und weniger gestalterisch-konzeptionell Lösungen entwickelt wurden. Ausgehend von dieser Erkenntnis haben wir die zeitabhängige Entwurfstypologie mit 13 Entwurfstypen für Bäume in Pflanzgefäße entwickelt, um die identifizierte Lücke an gestalterisch-konzeptionellen Lösungen für Bäume in Pflanzgefäßen zu schließen. Die Überprüfung der Entwurfstypen auf Plausibilität im Rahmen von zwei studentischen Entwurfsseminaren zeigte auf, dass durch die Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Beispielentwürfe viele Fragen und Unabwägbarkeiten schon in der Planungsphase eines Projektes beantwortet werden können und nicht wie in der Praxis oft noch nach dem Prinzip „Hoffnung“ gehandelt werden muss. Daher sehen wir die entwickelte Entwurfstypologie als große Bereicherung für Planer:innen bei der Umsetzung zukünftiger Projekte mit Bäumen in Pflanzgefäßen.

Wir sind der Überzeugung, dass die Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt maßgeblich dazu beitragen können, um Vorbehalte zur Sinnhaftigkeit von Bäumen in Pflanzgefäßen zur Kühlung von dichten und hochgradig versiegelten urbanen Räumen abzubauen. Wir möchten jedoch zu keinem Zeitpunkt suggerieren, dass Bäume in Pflanzgefäße eine Lösung sind, die Planer:innen von der Verantwortung befreien, eine gute Stadtplanung mit großzügigen Grünflächen und einer Vielzahl an Bäumen im Boden zu entwickeln. Denn unsere Ergebnisse belegen eindeutig, dass Bäume in Pflanzgefäße nur dann eine Alternative zu Bäumen in Pflanzgefäßen sind, wenn sie dort eingesetzt werden, wo keine Bäume in den Boden gepflanzt werden können. Bäume in Pflanzgefäßen stellen somit nur eine sinnvolle Ergänzung zu Bäumen im Boden dar, aber keinen 1zu1 Ersatz.

7. Publikationen, Vorträge, Studierenden- und Doktorarbeiten

Im Zeitraum des Forschungsprojektes wurden drei wissenschaftliche Artikel im Rahmen des Forschungsprojektes publiziert: „Trees in Planters – A Case Study of Time-Related Aspects“ (Fleckenstein et al. 2022, land), „How good are containerized trees for urban cooling?“ (Rahman et al. 2022, Urban Forestry & Urban Greening) und „Trees in Planters – Growth, structure and exosystem services of *Platanus x hispanica* and *Tilia cordata* and their reaction to soil drought“ (Dervishi et al. 2023, Urban Forestry & Urban Greening). Zudem wurden in den Zeitschriften Transforming Cities 3/2022 und GebäudeGrün 4/2022 Fachartikel zum Forschungsprojekt veröffentlicht. Des Weiteren wurde das Forschungsprojekt sowie erste Zwischenergebnisse in einigen Vorträgen der Projektbeteiligten der Fachwelt vorgestellt: Christoph Fleckenstein am BuGG-Tag der Forschung im Mai 2022 in Stuttgart; Doctoral Candidates Day der TU München im Juli 2022 und im März 2023 in München; ZSK-Symposium im Juni 2023 in München, StraßenRaumExperimente im Juli 2023 in München; ECLAS-Konferenz im September 2023 in Brunn; LASKO im Oktober 2023 in Freising, Mohammad Rahman am Weihenstephaner Forum im Oktober 2022 in Freising; GfÖ-Konferenz im September 2023 in Leipzig; WFUF Conference im Oktober 2023 in Washington DC und Vjosa Dervishi im Seminar Forstliches Versuchswesen im Wintersemester 2022/23. Außerdem gab es im Sommersemester 2020; im Sommersemester 2022 und im Wintersemester 2022/23 an das Forschungsprojekt angelehnte Studierendenseminare an der Professur für Green Technologies in Landscape Architecture, in dem die Studierenden Projekte mit Bäumen in Pflanzgefäßen bzw. zeitliche Entwurfskonzepte für Bäume in Pflanzgefäßen in realen räumlichen Kontexten entwickelten. Außerdem wurden folgende Masterthesen abgeschlossen: „Potentials of containrized trees to provide cooling benefits“ (Jiwon Kim, Juli 2023) und „Temporal Strategies for a Greener Munich“ (Juan Felipe Barragan Munevar, Oktober 2023). Als Abschluss des Forschungsprojektes wurde der Leitfaden für Bäume in Pflanzgefäßen veröffentlicht und am 28.05.2024 einem breiten Fachpublikum vorgestellt. Dem Forschungsprojekt ist die Doktorarbeit von Christoph Fleckenstein „Untersuchung relevanter Wachstumsfaktoren und Entwicklung zeitbasierte Entwurfskonzepte zur Verwendung von Bäumen in Pflanzgefäßen“ (Arbeitstitel) angeschlossen.

8. Wichtige Abkürzungen und Fachbegriffe

Brusthöhendurchmesser	Durchmesser gemessen auf der Brusthöhe (1,3 Meter)
Chamäleon-Tropfer	bestehen aus einem Tropfer, der in die Seitenwand eines PE-Wasserschlauchs gesteckt wird und über eine bestimmte Tropfrate in einem bestimmten Wasserdruckbereich verfügt. Der Tropfer ist durch ein Stück Schlauch mit einem Pfeiltropfer verbunden. Der Pfeiltropfer wird in Pflanzennähe in das Substrat gesteckt.
Durchmesserzuwachs	Zuwachs des Baumstammes, zumeist gemessen in 1,30 m Höhe (=Brusthöhendurchmesser)
DWD	Deutscher Wetterdienst
OK Boden	Oberkante Boden, ist die Höhenkoordinate für den gewachsenen Boden
Phänologie	die im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Entwicklungserscheinungen von Pflanzen und Tieren
STU 10/12 2xv	STU = Stammumfang, 10/12 = Stammumfang in Zentimetern, 2xv = Anzahl der Verschulungen / Verpflanzungen in der Baumschule
Vegetationstechnik	umfasst alle Aspekte, die bei der Pflanzung und Pflege von Pflanzen (Vegetation) berücksichtigt werden müssen
VWC	Volumetrischer Wassergehalt gibt den Volumenanteil des Wassers

9. Literaturverzeichnis

1. References

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/impp.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 Baumpflegetage*, 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. Kornmeier, M. *Wissenschaftlich schreiben leicht gemacht: Für Bachelor, Master und Dissertation*; UTB, 2018, ISBN 9783825250843.
22. Mieg, H.A.; Näf, M. *Experteninterviews: in den Umwelt- und Planungswissenschaften*. Eine Einführung und Anleitung, 2.th ed.; ETH Zürich, 2005.
23. Wrede, A.; Ufer, T.; Averdieck, H. Root Pouch braucht den Vergleich nicht zu scheuen. *Deutsche Baumschule* **2017**, *02/2017*, 38–40.
24. Balder, H. *Die Wurzeln der Stadtbäume: Ein Handbuch zum vorbeugenden und nachsorgenden Wurzelschutz*; Parey: Berlin, 1998.
25. 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.
26. Wraith, J.M.; Wright, C.K. Soil Water and Root Growth. *HortScience* **1998**, *33*, 951–959.
27. DeGaetano, A.T. Specification of soil volume and irrigation frequency for urban tree containers using climate data. *Journal of Arboriculture* **2000**, *26*, 142–151.
28. 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.
29. 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.
30. Ow, L.F.; Ghosh, S. Urban cities and road traffic noise: Reduction through vegetation. *Applied Acoustics* **2017**, *120*, 15–20, doi:10.1016/j.apacoust.2017.01.007.
31. Passioura, J.B. Viewpoint: The perils of pot experiments. *Funct. Plant Biol.* **2006**, *33*, 1075–1079, doi:10.1071/FP06223.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. Clark, J.R.; Kjelgren, R. Water as a limiting factor in the development of urban trees. *Journal of Arboriculture* **1990**, *16*, 203–208.
38. 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.

39. 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.
40. 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.
41. Neely, D.; Himelick, E.B. Fertilizing and watering trees. *Illinois Natural History Survey Circular* **1966**, *52*, 1–20.
42. Kutschera, L.; Lichtenegger, E. *Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher*, 2. Aufl.; Stocker: Graz, 2013, ISBN 3702009280.
43. Wessolly, L.; Erb, M. *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*; Patzer: Berlin, Hannover, 2014, ISBN 9783876171289.
44. 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.
45. Böll, S.; Schönfeld, P.; Körber, K.; Herrmann, J.V. Stadtbäume unter Stress: Projekt »Stadtgrün 2021« untersucht Stadtbäume im Zeichen des Klimawandels. *LWF aktuell* **2014**, *98*, 4–8.
46. Graves, W.R. Urban soil temperatures and their potential impact on tree growth. *Journal of Arboriculture* **1994**, *20*, 24–27.
47. 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.
48. Tsakalimi, 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.
49. Falik, O.; Reides, P.; Gersani, M.; Novoplansky, A. Root navigation by self inhibition. *Plant, Cell and Environment* **2005**, *2005*, 562–569.
50. 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.
51. 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.
52. Townend, J.; Dickinson, A.L. A comparison of rooting environments in containers of different sizes. *Plant and Soil* **1995**, *175*, 139–146.
53. 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.
54. NeSmith, D.S.; Duval, J.R. The effect of container size. *Horttechnology* **1998**, *8*.
55. Appleton, B.L. Nursery production methods for improving tree roots - an update. *Journal of Arboriculture* **1995**, *21*, 265–270.
56. 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.
57. 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.

58. 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.
59. 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.
60. Gilman, E.F. Container types. Available online: <http://hort.ifas.ufl.edu/woody/containers-more.shtml> (accessed on 3 December 2020).
61. 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.
62. Edean, 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.
63. Rune, G. Slits in Container Wall Improve Root Structure and Stem Straightness of Outplanted Scots Pine Seedlings. *Silva Fennica* **2003**, *2003*.
64. Carlson, L.W.; Edean, 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.
65. 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.
66. Kaspar, T.C.; Bland, W.L. Soil temperature and root growth. *Soil Science* **1992**, *154*, 290–299.
67. 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.
68. *Handbuch der Pflanzenkrankheiten: Begründet von Paul Sorauer*; Rademacher, B.; Richter, H., Eds., 7., vollständig neugestaltet; Paul Parey: Berlin und Hamburg, 1985.
69. 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.
70. 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.
71. 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.
72. 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*.
73. 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.
74. 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.
75. Halverson, H.G.; Heisler, G.M. Soil temperatures under urban trees and asphalt. *Research Paper NE* **1981**, *481*, 1–6.
76. 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.
77. 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.
78. 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.

79. 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.
80. Bunt, A.C.; Kulwiec, Z.J. The effect of container porosity on root environment and plant growth. *Plant and Soil* **1970**, 65–80.
81. 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.
82. 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.
83. 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.
84. 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.
85. 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.
86. Kawaletz, H.; Mölder, I.; Annighöfer, P.; Terwei, A.; Zerbe, S.; Ammer, C. Pot experiments with woody species – a review. *Forestry: An International Journal of Forest Research* **2014**, *87*, 482–491, doi:10.1093/forestry/cpu017.
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. Marler, T.E.; Willis, D. Chemical or Air Root-Pruning Containers Improve Carambola, Longan, and Mango Seedling Root Morphology and Initial Root Growth after Transplanting. *Journal of Environmental Horticulture* **1996**, *14*, 47–49.
89. Ruter, J.M. Growth Responses of Four Vigorous-rooted Tree Species in Cupric Hydroxide-treated Containers. *HortScience* **1994**, *29*, 1089.
90. Gerhold, H.D.; Sacksteder, C.J. Better ways of selecting trees for urban plantings. *Journal of Arboriculture* **1982**, *8*, 145–153.
91. Roloff, A.; Bonn, S.; Gillner, S. Klimawandel und Baumartenwahl in der Stadt: Entscheidungsfindung mit der Klima-Arten-Matrix (KLAM) **2008**.
92. 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.
93. 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.
94. 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*.
95. 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.
96. Tsakalidimi, 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.
97. 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.
98. 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.
 99. Roloff, A. Urbane Baumartenwahl im Klimawandel. In *17. Kasseler Gartenbautage*, 2010.
 100. Symes, P.; Connellan, G. Water Management Strategies for Urban Trees in Dry Environments: Lessons for the Future. *Arboriculture & Urban Forestry* **2013**, *39*, 116–124.
 101. Heinrich, A.; Gion Saluz, A. Lenkung der Baumwurzeln in Stadtbaums substraten. In *Versuche in der Landespflege: Gemeinsame Veröffentlichung der Forschungsinstitute des deutschen Gartenbaus*; Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., Ed., 2017; pp 40–46.
 102. Bilderback, T.E.; Fonteno, W.C. Effects of Container Geometry and Media Physical Properties on Air and Water Volumes in Containers. *Journal of Environmental Horticulture* **1987**, *5*, 180–182.
 103. Pretzsch, H. *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2019, ISBN 978-3-662-58154-4.
 104. Easlson, H.M.; Bloom, A. Easy Leaf Area: Automated Digital Image Analysis for Rapid and Accurate Measurement of Leaf Area. *Appl. Plant Sci.* **2014**, *2*, 1400033, doi:10.3732/apps.1400033.
 105. 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.
 106. 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.
 107. Anyia, A.; Herzog, H. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. *European Journal of Agronomy - EUR J AGRON* **2004**, *20*, 327–339, doi:10.1016/S1161-0301(03)00038-8.
 108. Álvarez, S.; Sánchez-Blanco, M.J. Long-term effect of salinity on plant quality, water relations, photosynthetic parameters and ion distribution in *Callistemon citrinus*. *Plant biology (Stuttgart, Germany)* **2013**, *16*, doi:10.1111/plb.12106.
 109. STOKES, A.; Mattheck, C. Variation of Wood Strength in Tree Roots. *Journal of Experimental Botany - J EXP BOT* **1996**, *47*, 693–699, doi:10.1093/jxb/47.5.693.
 110. Landezine. Brown Hart Gardens. Available online: <http://landezine.com/index.php/2015/03/brown-hart-gardens-by-bdp/> (accessed on 27 July 2021).
 111. Grosvenor. Brown Hart Gardens: Setting the scene. Available online: <https://www.grosvenorlondon.com/home/the-london-estate/public-realm/projects/completed-projects/brown-hart-gardens/brownhartgardensdeckboardspage19> (accessed on 5 August 2021).
 112. Grosvenor. Brown Hart Gardens: Proposals for feedback, Part 1. Available online: <https://www.grosvenorlondon.com/home/the-london-estate/public-realm/projects/completed-projects/brown-hart-gardens/brownhartgardensdeckboardspage1016> (accessed on 5 August 2021).
 113. Grosvenor. Brown Hart Gardens: A rejuvenated oasis in the heart of London. Available online: <https://www.grosvenor.com/our-properties-and-places/brown-hart-gardens> (accessed on 27 July 2021).

114. Klishch, O. Design of Open Public Spaces in the Context of World Trends in City Planning. *Demùurg: ìdei, tehnol., perspekt. dizajn.* **2019**, 2, 6–15, doi:10.31866/2617-7951.2.1.2019.170352.
115. Starzak, J.; Strębicki, D. Courtyard City Hall. Available online: <https://www.starzakstrebicki.eu/en/project/courtyard-city-hall/> (accessed on 28 July 2021).
116. Tamborska, B. Refurbishment of a historical building and city hall courtyard in Poznan. Available online: <https://www.designverse.com.cn/content/home/article/refurbishment-of-a-historical-building-and-city-hall-courtyard-in-poznan-atelier-starzak-strebicki-en> (accessed on 28 July 2021).