



TUM School of Life Sciences
Technische Universität München
Naturschutz und Landschaftsplanung
Master of Science

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades Master

Klimaanpassung durch Stadtbäume: Zustand, Entwicklung und Anpassungspotential des Baumbestands in Speyer

Climate adaptation through urban trees:
condition, dynamics and adaptation
capacity of the tree population in Speyer

Erstprüfer:	Prof. Dr. Thomas Rötzer
Zweitprüferin:	Dr. Astrid Reischl
Verfasserin:	Julia Katharina Kamm, 03720081

München, 15. Januar 2026

Danksagung

Ich danke den Mitarbeiter*innen der Stadt Speyer, die durch die Bereitstellung der erforderlichen Daten sowie durch ihre kompetente Unterstützung die Bearbeitung dieses Themas ermöglicht haben. Ein besonderer Dank gilt zudem meinem Betreuer Prof. Rötzer, der viel Zeit und Engagement in die Betreuung dieser Masterarbeit investiert hat und mir stets mit fachlichem Rat zur Seite stand. Darüber hinaus möchte ich mich herzlich bei den engagierten Korrekturleser*innen für ihre Zeit sowie für die wertvollen und anregenden Hinweise bedanken.

Zusammenfassung

Stadtbäume stellen etliche Ökosystemdienstleistungen zur Verfügung und leisten einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung von Hitzestress in Städten. Durch den Klimawandel und die erschwerten Standortbedingungen in urbanen Räumen sind das Wachstum und die Leistungsfähigkeit von Stadtbäumen jedoch negativ beeinträchtigt. Die Stadt Speyer ist eine der am stärksten vom Hitzestress betroffenen deutschen Städte. Es wird deshalb untersucht, welche Leistungen die Bäume des Katasters der Stadt Speyer aktuell und in Zukunft bereitstellen und wie diese unterstützt werden können. Dabei werden verschiedene Maßnahmen, Entsiegelung, Bewässerung und eine Kombination der Beiden, im CityTree Model simuliert. Das Modell arbeitet prozessbasiert und kann das Wachstum und die Ökosystemdienstleistungen für Einzelbäume in Abhängigkeit von deren Eigenschaften, sowie Umwelt- und Klimabedingungen simulieren. Die Leistungsverluste der Stadtbäume in Speyer unter zukünftigen Klimaszenarien unterstreichen die Wichtigkeit der Planung und Umsetzung geeigneter Maßnahmen. In diesem Zusammenhang ist die Entsiegelung als langfristiger Eingriff zu nennen, welcher eine einmalige Investition erfordert und dauerhaft verbesserte Standortbedingungen und eine optimierte Leistungsfähigkeit der Bäume ermöglicht. Bewässerungsmaßnahmen erzielen hohe Steigerungen der Ökosystemdienstleistungen, welche die der Entsiegelung in der Kühlleistung übersteigen. Bewässerung ist jedoch ein temporärer Eingriff, welcher ressourcenintensiv und personell aufwendig ist. Die Kombination aus Entsiegelung und Bewässerung kann zusätzliche Vorteile bringen und eignet sich als unterstützende Maßnahme zur Sicherung der Ökosystemdienstleistungen in starken Trockenheitsphasen.

Abstract

Urban trees provide ecosystem services and therefore make an important contribution to reducing heat stress in cities. However, climate change and the challenging site conditions in urban environments negatively affect the growth and performance of urban trees. The city Speyer is one of the German cities most severely affected by heat stress. Therefore, this study investigates which ecosystem services the trees listed in the municipal tree cadastre of Speyer currently provide and are expected to provide in the future, and how these services can be supported. Different management measures, reducing soil sealing, providing irrigation, and a combination of both are simulated using the CityTree model. The model is process based and able to simulate growth and ecosystem services of individual trees as a function of tree specific characteristics as well as environmental and climatic conditions. The projected losses in ecosystem services of urban trees in Speyer under future climate scenarios highlight the importance of planning and implementing appropriate management measures. In this context, reducing soil sealing represents a longterm intervention that requires a single investment and enables permanently improved site conditions and optimized tree performance. Irrigation measures result in substantial increases in ecosystem services, exceeding those achieved by reducing soil sealing in terms of their cooling performance. However, irrigation is a temporary intervention that is resource intensive and requires considerable labour input. The combination of reducing soil sealing and irrigation can provide additional benefits and is suitable as a supporting measure to secure ecosystem services during periods of severe drought.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG.....	1
ZUSAMMENFASSUNG.....	
ABSTRACT	
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	II
TABELLENVERZEICHNIS.....	III
ANHANGSVERZEICHNIS	VI
1. EINLEITUNG.....	1
1.1 URBANE RÄUME IM KLIMAWANDEL	1
1.2 KLIMAAANPASSUNG DURCH STADTBÄUME	2
1.3 ÖKOSYSTEMDIENSTLEISTUNGEN UND DEREN EINFLUSSFAKTOREN.....	4
1.4 HITZESTRESS IN DER STADT SPEYER.....	7
2. MATERIAL UND METHODEN	9
2.1 BAUMKATASTER DER STADT SPEYER UND BERECHNUNG FEHLENDER WERTE	9
2.2 BAUMARTENZUORDNUNG.....	13
2.3 ALLOMETRISCHE GLEICHUNGEN	14
2.4 ANALYSE DER BAUMKATASTERDATEN	17
2.5 MODELLIERUNG DER STADTBÄUME - WACHSTUMSMODELL CITYTREE.....	17
2.6 SIMULATIONSGRUNDLAGEN.....	18
2.7 SIMULIERTE ÖKOSYSTEMDIENSTLEISTUNGEN	21
3 WACHSTUM UND ÖKOSYSTEMDIENSTLEISTUNGEN DER STADTBÄUME IN SPEYER	22
3.1 AKTUELLER BAUMBESTAND	22
3.2 WACHSTUM UND ÖKOSYSTEMDIENSTLEISTUNGEN	30
3.3 MAßNAHMEN ZUR MITIGATION VON KLIMAAUSWIRKUNGEN	41
3.3.1 <i>Potential von Entsiegelungsmaßnahmen.....</i>	<i>43</i>
3.3.2 <i>Potential von Bewässerungsmaßnahmen</i>	<i>49</i>
3.3.3 <i>Potential von kombinierten Maßnahmen.....</i>	<i>54</i>
3.4 FOKUSORT DOMPLATZ	57
4 DISKUSSION	67
4.1 CHARAKTERISIERUNG DES BAUMBESTANDES.....	67
4.2 WACHSTUM UND ÖKOSYSTEMDIENSTLEISTUNGEN UNTER AKTUELLEN BEDINGUNGEN UND KLIMASZENARIEN	69
4.3 KLIMAAANPASSUNG DURCH STADTBÄUME	72
4.3.1 <i>Entsiegelungsmaßnahmen.....</i>	<i>72</i>
4.3.2 <i>Bewässerungsmaßnahmen</i>	<i>74</i>
4.3.3 <i>Kombinierte Maßnahmen</i>	<i>75</i>
4.4 GRENZEN DER DATENGRUNDLAGE UND MODELLIERUNG	77
4.5 PERSPEKTIVEN FÜR ZUKÜNFTIGE FORSCHUNGSARBEITEN	78
5 SCHLUSSFOLGERUNG - BEDEUTUNG DER ERGEBNISSE FÜR DIE URBANE BAUMPLANUNG	79
LITERATURVERZEICHNIS	80
ANHANG	87
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG.....	109

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Auszug aus Color Infrared Images (CIR) Stadt Speyer in den oberen beiden Darstellungen (Geoportal 2025). Datensatz zu Objekthöhen in Speyer durch die Rasterrechnung DOM-DGM (Stadt Speyer 2025) in der unteren Abbildung.	11
Abb. 2 Klimabedingungen der Stadt Frankfurt unter verschiedenen Klimaszenarien. Diese Klimadaten werden für die Simulationen der Stadtbäume in Speyer verwendet, da keine hinreichend langen Klimazeitreihen für die Stadt Speyer verfügbar sind (eigene Darstellung. Datengrundlage: ZSK 2024). Rote Linie = mittlere Temperatur (°C), blaue Balken = durchschnittlicher Niederschlag (mm).	20
Abb. 3 Räumliche Biomasseverteilung (Bti in kg C/Baum/Jahr) der Individuen des Baumkatasters in Speyer. Darstellung als Heatmap in grün (dunkel beschreibt Orte mit höherem, hell beschreibt Orte mit niedrigerem Biomassevorkommen).....	25
Abb. 4 Räumliche Verteilung der Bäume in Speyer nach Trockenheitstoleranz (Einteilung der Kategorien basierend auf Werten von Niinemets and Valladares 2006) hoch = ≥ 3 (grün); mittel = < 3 (gelb), gering < 2 (rot).	26
Abb. 5 Relative Anzahl der Bäume nach Trockenheitstoleranz und Stammdurchmesserklassen (10 bis 100) (Einteilung der Trockenheitstoleranz basierend auf Werten von Niinemets and Valladares 2006; hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2).	27
Abb. 6 Stammdurchmesserverteilung der Stadtbäume des Baumkatasters in Speyer, eingeteilt in 10 Klassen, in absoluten und relativen Werten. Die Durchmesser-Verteilung lässt sich durch eine exponentielle Regression (y) erklären und wird als gepunktete Linie dargestellt.	28
Abb. 7 Räumliche Verteilung der Stammdurchmesser in Speyer (cm), Klasseneinteilung nach Quantilen.	29
Abb. 8 Versiegelung unter den Stadtbäumen von Speyer (in %). Klasseneinteilung nach Quantilen... 30	
Abb. 9 Sommerliche Evapotranspirationskühlung (GWh) der Stadtbäume des Katasters in Speyer unter vier verschiedenen klimatischen Bedingungen.	34
Abb. 10 Jährlicher Biomassezuwachs (kt Tg/Baum/a) der Stadtbäume des Katasters in Speyer unter vier verschiedenen klimatischen Bedingungen.	35
Abb. 11 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) der Bäume einer mittleren Trockenheitstoleranz unter vier Klimaszenarien. Darstellung als Boxplots.	38
Abb. 12 Baumstandorte aus dem Kataster der Stadt Speyer mit einer Versiegelung ab 60 %. Diese Bäume werden für die Simulation der Entsiegelungs-, Bewässerungs- und Kombinationsmaßnahmen verwendet.	42
Abb. 13 Evapotranspirationskühlung im Sommer (GWh) der Bäume des Baumkatasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Entsiegelungsmaßnahmen (- 20, -30 und -50 P. p.).....	47
Abb. 14 Biomassezuwachs (t Tg/a) der Bäume des Baumkatasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Entsiegelungsmaßnahmen (- 20, -30 und -50 P. p.).....	48
Abb. 15 Abfluss (Millionen l) unter den Bäumen des Baumkatasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Entsiegelungsmaßnahmen (- 20, -30 und -50 P. p.).....	49
Abb. 16 Evapotranspirationskühlung (GWh) der Bäume des Katasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Bewässerungsszenarien (80, 125 und 250 l/Baum/Woche)	52
Abb. 17 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) der Bäume des Katasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Bewässerungsszenarien (80, 125 und 250 l/Baum/Woche)	53
Abb. 18 Abflussverhalten (Millionen l) unter den Bäumen des Katasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Bewässerungsszenarien (80, 125 und 250 l/Baum/Woche)	54
Abb. 19 Fokusstandort Domplatz. Baumstandorte und deren Stammdurchmesser (cm). Klassenbildung nach Quantilen.	57
Abb. 20 Typen von Stammdurchmesserverteilung in Städten (Grafik selbst erstellt, basierend auf Morgenroth et al. 2020).....	67

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Im CityTree Model parametrisierte Baumarten mit Zuordnungsnummer, wissenschaftlicher und deutscher Bezeichnung, sowie deren Toleranz gegenüber Trockenheit und Beschattung nach Niinemets and Valladares aus dem Jahr 2006.....	14
Tab. 2 Koeffizienten nach Baumart, welche für die Berechnung der Kronenlänge benötigt werden. Berechnet mit multiplen Regressionsanalysen von Baumdaten aus München (Rötzer 2025) für alle CityTree Model-Baumarten k.A. = keine Angabe (Berechnet von Rötzer 2025) und fünf weitere Baumarten (selbst berechnet, basierend auf Daten von Rötzer 2025).....	15
Tab. 3 Koeffizienten nach Baumart, welche für die Berechnung des Stammdurchmessers (dbh) benötigt werden. Berechnet mit multiplen Regressionsanalysen von Baumdaten aus München (Rötzer 2025) für alle CityTree Model-Baumarten, k.A. = keine Angabe (Berechnet von Rötzer 2025) und fünf weitere Baumarten (selbst berechnet, basierend auf Daten von Rötzer 2025).....	16
Tab. 4 Im CityTree Model verwendete Stammdurchmesserklassen. Die Stadtbäume des Katasters werden für die Simulation einer der zehn Klassen zugeteilt.	18
Tab. 5 Am häufigsten vorkommende Baumarten auf öffentlichen Grund in Speyer (grün = Baumarten im CityTree Model; N = Baumanzahl; Toleranz = Toleranz gegenüber Trockenheit in n – niedrig, m – mittel und h – hoch nach Niinemets and Valladares 2006; dbh = Stammdurchmesser; H = Baumhöhe; SVF = Sky View Factor) Bei „Malus“ handelt es sich um eine Gattung. (Basierend auf den Daten des Baumkatasters der Stadt Speyer 2025)	23
Tab. 6 Ökosystemdienstleistungen der Bäume des Katasters in Speyer unter dem langjährigen Mittel, unterteilt nach Trockenheitstoleranz (Zuordnung basierend auf Niinemets and Valladares 2006: hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2) Dargestellte Dienstleistungen: Evapotranspirationskühlung (kWh im Sommer), Beschattungskühlung (kWh im Sommer) und Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a).	32
Tab. 7 Ökosystemdienstleistungen der Bäume des Katasters im langjährigen Mittel (Evapotranspirationskühlung in kWh im Sommer und Biomassezuwachs in kg Tg/Baum/a) Es werden die zwölf Baumarten des CityTree Models differenziert. (\bar{x} = Mittelwert; S = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient).....	33
Tab. 8 Evapotranspirationskühlung (kWh im Sommer) unter vier klimatischen Bedingungen nach Trockenheitstoleranz der Bäume (Zuordnung basierend auf Niinemets and Valladares 2006: hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2)	36
Tab. 9 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) unter vier klimatischen Bedingungen nach Trockenheitstoleranz der Bäume (Zuordnung basierend auf Niinemets and Valladares 2006: hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2)	37
Tab. 10 Evapotranspirationskühlung (kWh im Sommer) nach Baumarten des CityTree Models unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Vgl. L.M. = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel)	39
Tab. 11 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) nach Baumarten des CityTree Models unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Vgl. L.M. = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel).....	40
Tab. 12 Vergleich struktureller Eigenschaften der Bäume des Katasters (Gesamt Kataster) mit den Bäumen, welche von einer hohen Versiegelung (ab 60 %) betroffen sind und für die Maßnahmen simuliert werden (≥ 60 % Surface Sealing (SS); Toleranz n = absolute und relative Anzahl Bäume in der jeweiligen Trockenheitstoleranzklasse; dbh = Stammdurchmesser; SVF = Sky View Factor)	41
Tab. 13 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im langjährigen Mittel (L.M.) unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel).....	43
Tab. 14 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer	

Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel)	44
Tab. 15 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5 unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)	45
Tab. 16 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5 unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)	45
Tab. 17 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel).....	50
Tab. 18 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM)	50
Tab. 19 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	51
Tab. 20 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	51
Tab. 21 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen bestehend aus Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	55
Tab. 22 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen bestehend aus Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	56
Tab. 23 Eigenschaften der Bäume am Fokusstandort Domplatz (Baumart; dbh = Stammdurchmesser; SVF = Sky View Factor; S = Standardabweichung)	58
Tab. 24 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20, 30 und 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	60
Tab. 25 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20, 30 und 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	61
Tab. 26 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125 und 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	62

Tab. 27) Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125 und 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	63
Tab. 28 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen mit jeweils Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	65
Tab. 29 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/Jahr) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen mit jeweils Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario).....	66

Anhangsverzeichnis

<i>Anhang 1 Baumartenzuordnung der Bäume des Baumkatasters der Stadt Speyer. Zuordnung der Toleranz gegenüber Trockenheit und Beschattung nach Niinemets and Valadares 2006, Baumartenzuordnungsvergleich von Schadel 2024 und Landmann 2024, sowie eigene Zuordnung fehlender Baumarten des Katasters und der Trockenheitstoleranzklassen niedrig, mittel und hoch. Nr. = Baumnummer im CityTree Model.</i>	<i>87</i>
<i>Anhang 2 Verteilung der Durchmesserklassen von den fünfzehn am häufigsten vorkommenden Baumarten in Speyer. Daten basierend auf bereitgestelltem Kataster (2025).....</i>	<i>103</i>
<i>Anhang 3 Verteilung der Höhenklassen von den fünfzehn am häufigsten vorkommenden Baumarten in Speyer. Daten basierend auf bereitgestelltem Kataster (2025).</i>	<i>105</i>
<i>Anhang 4 Evapotranspirationskühlung (kWh) der Bäume des Baumkatasters in Speyer nach Trockenheitstoleranz und den jeweiligen simulierten Klimabedingungen.....</i>	<i>107</i>
<i>Anhang 5 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) der Bäume des Baumkatasters in Speyer nach Trockenheitstoleranz und den jeweiligen simulierten Klimabedingungen.....</i>	<i>108</i>

1. Einleitung

1.1 Urbane Räume im Klimawandel

Urbane Räume sind auf Grund des Klimawandels zunehmend von Hitzestress betroffen, der als eine der zentralen Herausforderungen der aktuellen Stadtentwicklung zu nennen ist (Santamouris and Vasilakopoulou 2024). Besonders stark betroffen sind Städte mit hoher Versiegelung, in denen der Urban Heat Island Effekt (UHI) zu deutlich erhöhten Temperaturen im Vergleich zum Umland führt (ebd.). Die Lufttemperatur in Städten kann dabei je nach Tageszeit um 5 bis 15 °C über den Werten des Umlandes liegen (Santamouris 2013). Der Hitzeinseleffekt wird durch den Klimawandel zusätzlich intensiviert, da Hitzetage häufiger und Hitzewellen länger anhaltend vorkommen (Santamouris and Vasilakopoulou 2024). Eine Hitzewelle liegt laut dem Deutschen Wetterdienst (DWD) vor, sobald an mindestens drei Tagen hintereinander Temperaturen über 28 °C erreicht werden (DWD 2025a). Ein Hitzetag wird als ein Tag mit einem Temperaturmaximum von mindestens 30 °C definiert (ebd.).

Der Hitzeinseleffekt in urbanen Räumen ist auf die Urbanisierung zurückzuführen, welche mit einem Verlust an Grün- und Wasserflächen, sowie einer Zunahme versiegelter Flächen einhergeht (Rastkhadiv et al. 2025). Versiegelte Böden, beispielsweise aus Beton oder Asphalt speichern auf Grund ihres niedrigen Albedos tagsüber große Mengen Wärme und geben diese nachts wieder an die Luft ab (Stone et al. 2010). Dieser Ablauf führt dazu, dass der Urban Heat Island Effekt nachts besonders stark ist (Antunes Azevedo et al. 2016; Lopes et al. 2025). In Paris beispielsweise konnten bis zu 7 °C höhere nächtliche Temperaturen gemessen werden (Lac et al. 2013). Zudem können asphaltierte und betonierte Oberflächen an heißen Tagen Oberflächentemperaturen von über 60 °C erreichen, was die Wärmebelastung zusätzlich erhöht (Seeburg et al. 2022).

Diese erhöhten Temperaturen in urbanen Räumen gehen mit einem erhöhten Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung einher (Madrigano et al. 2015; DWD 2025b). Hitze führt allgemein zu einer Übersterblichkeit und einer Zunahme von Herz-, Kreislauf- und Atemwegserkrankungen, erhöhten Cholesterinwerten, systemischen Entzündungen, sowie zu einem Anstieg von Nierenproblemen und psychischen Belastungen (Tong et al. 2021). Das individuelle Gesundheitsrisiko wird durch diverse Faktoren beeinflusst, darunter Wohnlage, Wohnungstyp (z. B. Dachgeschosswohnung), Zugang zu klimatisierten Räumen, soziale Kontakte, materielle Ressourcen und Vulnerabilität der Personentypen (Tong et al. 2021; Madrigano et al. 2015). Die Übersterblichkeit war unter anderem während der Hitzewelle im Trockenjahr 2003 besonders ausgeprägt, durch die europaweit rund 70.000 Menschen starben (Robine et al. 2007). Für die Sommermonate stehen zudem seit 2023 aktuelle Statistiken und Analysen des Robert Koch Institutes (RKI) zu hitzebedingten Mortalitäten in Deutschland zur Verfügung (RKI 2025). Demnach kam es im Jahr 2022 zu einer Übersterblichkeit von etwa

4.500 Menschen, während in 2025 rund 2.500 hitzebedingte Sterbefälle in Deutschland vom RKI geschätzt wurden. Der höchste Anteil der betroffenen Personen sind 75 Jahre oder älter. Die Hitzebelastung ist somit eine der größten gesundheitlichen Risiken für das alternde Europa zu nennen (Robine et al. 2007; RKI 2025).

Die Hitzebelastung hat in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zugenommen (GDV 2022). Die mittlere Temperatur ist seit 1881 (Beginn der Wetteraufzeichnung) um etwa 1,6 °C gestiegen, was zu einer deutlichen Zunahme von Hitzetagen geführt hat (ebd.). Besonders betroffen sind der Osten und Südwesten Deutschlands (ebd.). Regional betrachtet hat die Stadt Speyer, im Zeitraum 2011 bis 2020 den höchsten Wert an Hitzetagen mit 23 Tagen pro Jahr zu verzeichnen (ebd.). Im Zeitraum 1951 bis 1960 wurden lediglich 9,3 Hitzetage registriert (ebd.). Somit hat sich die Menge im Zeitraum von 2011 bis 2020 mehr als verdoppelt.

Die zunehmenden Risiken und Herausforderungen durch häufige Hitzetage und Hitzewellen hat dazu geführt, dass der Schutz der Bevölkerung sowohl in der Wissenschaft, als auch in der Politik vermehrt behandelt wurde. Das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) betont die Wichtigkeit, eines verstärkten Engagements und Zusammenarbeit der gesamten Gesellschaft, um Maßnahmen zum gesundheitlichen Hitzeschutz über alle Ebenen hinweg erfolgreich umzusetzen (BMG 2025). Dabei sind die Erstellung von Hitzeaktionsplänen durch Länder und Kommunen ein zentraler Bestandteil (ebd.). Es ist wichtig, ganzheitliche und nachhaltige Strategien zu entwickeln und in die zukünftige Stadtplanung zu integrieren. Dabei sind naturbasierte Lösungen zu nennen, welche klimatischen Herausforderungen wirksam begegnen und zusätzliche Synergien zu ökologischen, sozialen und ökonomischen Themen bereitstellen (Veisi Nabikandi et al. 2025; Ferrario et al. 2024). Insbesondere Stadtbäume als Teil von Grüner Infrastruktur tragen durch ihre Ökosystemdienstleistungen, wie Beschattungs- und Evapotranspirationskühlung sowie Kohlenstoffspeicherung, maßgeblich zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas bei (Europäische Kommission 2013; Marando et al. 2022). Die folgenden Kapitel behandeln daher die Klimaanpassung durch Stadtbäume und die Einflussfaktoren auf deren Ökosystemdienstleistungen.

1.2 Klimaanpassung durch Stadtbäume

Eine der zentralen Strategien zur Anpassung an den klimawandelbedingten Hitzestress ist die Planung und Umsetzung Urbaner Grüner Infrastruktur (UGI) als Netzwerk aus natürlichen und naturnahen Flächen, welches ein breites Spektrum an Ökosystemdienstleistungen bereitstellt (Europäische Kommission 2013; Marando et al. 2022). Die Ziele der Grünen Infrastrukturen umfassen den Schutz der biologischen Vielfalt, die Anpassung an den Klimawandel, die Förderung des sozialen Zusammenhalts und die Unterstützung einer grünen Wirtschaft (Jato-Espino et al. 2023). Diese Ziele werden durch die bereitgestellten Ökosystemdienstleistungen und gestützt von

den Prinzipien der Integration, Konnektivität, sozialen Einbindung und Multifunktionalität erreicht (ebd.).

Als Bestandteil von Urbaner Grüner Infrastruktur spielen Stadtbäume eine wichtige Rolle, da sie zur Ästhetik und Aufenthaltsqualität von Orten, sowie der Regulierung urbaner Mikroklimata beitragen (Jato-Espino et al. 2023). Zudem sind Bäume die wichtigsten oberirdischen Kohlenstoffsinken und speichern zusammen mit weiterer Vegetation etwa 95 % des oberirdischen Kohlenstoffs (Richter et al. 2020). Im Rahmen einer Studie wurde die Rolle von UGI bei der Abkühlung des Urbanen Hitzeinseleffektes in 601 europäischen Stadtregionen untersucht (Marando et al. 2022). Dabei konnte herausgefunden werden, dass Bäume den städtischen Hitzeinseleffekt deutlich reduzieren. Um die durchschnittliche Lufttemperatur in der Stadt um 1 °C zu senken, ist eine Baumbedeckung von mindestens 16 % erforderlich (ebd.). Der Verlust von Baumkronenfläche korreliert nachweislich mit dem vermehrten Auftreten extremer Hitzeereignisse (Stone et al. 2010).

Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass Stadtbäume selbst von den Effekten des Klimawandels negativ betroffen sind. Vermehrte Trockenperioden gehen mit einer limitierten Wasserverfügbarkeit einher, welche häufig nicht ausreicht, um den Bedarf der Bäume ausreichend zu decken. Vermehrte Hitze führt dazu, dass einige Baumarten zwar ihre Stomata schließen und somit kurzfristig Wasserverluste durch Evapotranspiration reduzieren können, die Photosynthese, das langfristige Wachstum, die Kohlenstoffspeicherung und allgemein die Vitalität der Bäume jedoch eingeschränkt wird (Rahman et al. 2019; Moser et al. 2017). Sind die Stadtbäume zusätzlich stark versiegelt so treten weitere Stressfaktoren durch reduzierte Infiltration von Niederschlägen und erhöhten Bodentemperaturen auf (Rahman et al. 2019). Außerdem schwächen Hitze- und Trockenstress das Immunsystem von Bäumen, wodurch sie anfälliger für Schädlinge und Krankheiten werden (Richter et al. 2020). Insbesondere bei Jungbäumen und Arten mit einer geringen Trockenheitstoleranz führen wiederkehrende Hitzeperioden zu erhöhten Mortalitätsraten (Trapp et al. 2020). Somit kann festgestellt werden, dass Stadtbäume zwar eine wirksame Maßnahme zur Reduktion urbanen Hitzestresses darstellen, die Bereitstellung von Ökosystemdienstleistungen, sowie deren Vitalität jedoch zunehmend von den klimatischen Bedingungen und von erschwerten Standortbedingungen gefährdet werden. Die Wirksamkeit der Stadtbäume kann deshalb nur langfristig erhalten werden, wenn geeignete planerische, strukturelle und pflegerische Maßnahmen umgesetzt werden. Im folgenden Kapitel werden deshalb die zentralen Ökosystemdienstleistungen und Einflussfaktoren von Stadtbäumen beschrieben.

1.3 Ökosystemdienstleistungen und deren Einflussfaktoren

Die Ökosystemdienstleistungen von Stadtbäumen unterscheiden sich deutlich zwischen einzelnen Arten, Entwicklungsstadien, Standorten und weiteren strukturellen Bedingungen (Trapp et al. 2020; Moser et al. 2015; Moser et al. 2017). Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Kühlung durch Evapotranspiration und Beschattung, sowie die Kohlenstofffixierung näher betrachtet.

Eine der klimatisch gesehen wichtigsten Dienstleistungen, die Stadtbäume erbringen, ist die Kühlung durch Beschattung und Evapotranspiration (Rahman et al. 2020). Die Beschattung durch Baumkronen reduziert die kurzweilige solare Strahlung auf Boden- und Gebäudeoberflächen (ebd.). Dadurch verringert sich deren Oberflächentemperatur deutlich (ebd.). Studien belegen, dass Baumkronen je nach Art und Struktur zwischen 60 % und 90 % der Strahlung von den abgeschirmten Oberflächen abhalten können, was zu Oberflächenkühlungen von teilweise mehr als 20 °C führt (Rahman et al. 2020; Pattnaik et al. 2024; Jamei et al. 2016). Besonders in hochversiegelten Bereichen mit über 70 % ist dieser Kühlungseffekt besonders wichtig, da dort die Temperaturdifferenzen zwischen beschatteten und unbeschatteten Flächen am höchsten sind (Pattnaik et al. 2024). Die Intensität der Beschattung ist eng an den Blattflächenindex (LAI) gekoppelt, der als zentraler Parameter für die Kühlwirkung durch Beschattung von Baumkronen zu nennen ist (ebd.). Die Ausdehnung von beschatteten Flächen durch Bäume ist positiv mit der zunehmenden Größe und Alter der Bäume korreliert (Rötzer et al. 2020). Es konnte in diversen Studien festgestellt werden, dass Bäume mit einem dichten Kronenwerk und hohem LAI (z. B. *Tilia cordata*) deutlich höhere Temperaturreduzierungen hervorrufen (Pattnaik et al. 2024; Kántor et al., 2016; Kong et al. 2016; Jameia et al. 2016). Daraus lässt sich erschließen, dass Baumarten mit höherer Kronendichte in versiegelten Bereichen vorgezogen werden sollten, da sie dort die höchste Kühlleistung der Oberflächentemperatur erzielen (Rahman et al. 2019). Arten mit einer geringeren Kronendichte können insbesondere auf städtischen Grasoberflächen gepflanzt werden. Auf diesem Oberflächentyp war kein nennenswerter Unterschied zwischen den Bäumen mit hoher Kronendichte festzustellen (ebd.).

Hinsichtlich der Kühlung ist zudem die Evapotranspiration als Ökosystemdienstleistung für die Abkühlung der Lufttemperatur zu nennen. Durch die Verdunstung von Wasser über die Stomata der Blätter kann die unmittelbare Lufttemperatur um bis zu 3 °C reduziert werden (Rahman et al. 2020). Das Ausmaß der Evapotranspirationskühlung hängt jedoch stark von der Wasserverfügbarkeit, sowie der Holzanatomie der jeweiligen Baumart ab (Rahman et al. 2019). Diffusporige Arten wie *Tilia cordata* haben gleichmäßig verteilte Gefäße im Jahresring und können über die gesamte Vegetationsperiode hinweg Wasser transportieren und transpirieren (ebd.). Dadurch erzielen sie selbst unter Hitzestress eine kontinuierliche Evapotranspirationskühlung.

Sie sind jedoch zugleich anfälliger für Trockenstress, da sie ihre Stomata weniger regulieren können, um Wasserverlust bei akuter Knappheit zu vermeiden (ebd.). Ringporige Arten wie *Robinia pseudoacacia* hingegen, schließen ihre Stomata frühzeitig bei Hitzestress und reduzieren somit den Wasserverlust (ebd.). Diese Eigenschaft steigert ihre Resilienz gegenüber Trockenheit, verringert jedoch gleichzeitig die transpirative Kühlleistung (ebd.). Weil die Verfügbarkeit von Bodenwasser im urbanen Raum aufgrund von Versiegelung, Verdichtung und reduziertem Bodenvolumen stark eingeschränkt sein kann, können sich die tatsächlichen Effekte je nach Standort stark unterscheiden. An Standorten mit einer geringen Versiegelung ist die beobachtete Evapotranspirationskühlung deutlich höher als an Orten mit einer hohen Versiegelung. Das liegt an dem größeren Wurzelraum, durch den mehr Bodenfeuchtigkeit zur Verfügung steht und allgemein die Vitalität der Bäume unterstützt werden kann (Rahman et al. 2020). Die Kühlungswirkung durch Beschattung ist insgesamt größer als die der Evapotranspiration (Pattnaik et al. 2024). Das gilt insbesondere in stark versiegelten urbanen Räumen (ebd.).

Zudem spielt die räumliche Anordnung der Bäume eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Kühlungswirkung. Baumreihen an Straßen, clusterartige Baumgruppen oder Kombinationen aus Rasen- und Baumstrukturen in Parks erzeugen jeweils unterschiedliche Kühlungseffekte. Dabei sind insbesondere kompakte Baumgruppen hervorzuheben, welche im Vergleich zu Einzelbäumen ihre Umgebungstemperatur effektiver großflächig reduzieren können (Rahman et al. 2020; Bao et al. 2025). Clusterartig angeordnete Grünflächen kühlen zudem effektiver als zerstreute Grünflächen, weshalb Stadtplaner*innen Grüne Infrastruktur räumlich konzentrieren sollten (Bao et al. 2025). Kleinere Parks, welche aus einer Mischung aus Rasenflächen und Bäumen bestehen, verbessern das Stadtklima zusätzlich durch den „Oasen-Effekt“ (Rahman et al. 2020). Hinsichtlich des Straßenbegleitgrüns kann gesagt werden, dass zwei Baumreihen entlang von Hauptstraßen die besten Kühlungseffekte erzielen (Wu et al. 2025).

Bäume können neben der Kühlung durch Beschattung und Evapotranspiration auch Kohlenstoff speichern und somit einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Sie zählen zu den bedeutendsten oberirdischen Kohlenstoffsenken, welche gemeinsam mit anderen Vegetationstypen rund 95 % des oberirdischen Kohlenstoffs speichern (Richter et al. 2020). Die Menge der Kohlenstoffspeicherung ist von Art, Alter, und dem Wachstumsverhalten der Bäume abhängig. Artenreiche Baumbestände mit einer hohen strukturellen Vielfalt fördern nicht nur die Kohlenstoffspeicherung, sondern auch die Biodiversität, da unterschiedliche Baumarten und Altersklassen verschiedene Lebensräume für zahlreiche Tiere bereitstellen (Ramke et al. 2025).

Maßnahmen wie Entsiegelung und Bewässerung unterstützen die Ökosystemdienstleistungen der Bäume unter Hitze- und Trockenstress. Der Einfluss von Bewässerung auf die Leistungen und Vitalität urbaner Bäume ist in der Wissenschaft zunehmend untersucht worden, da Trocken- und Hitzestress in Städten den Wasserstress der

Bäume verstärken. In diversen Studien konnte nachgewiesen werden, dass regelmäßige Bewässerung in urbanen Räumen die Lufttemperatur um durchschnittlich 0,5 °C bis 2,3 °C reduzieren kann (Daniel et al. 2018; Gao et al. 2020). Monatliche Bewässerung führt bereits zu einer deutlichen Reduzierung der Lufttemperatur, während wöchentliche Bewässerung der Bäume diese Werte nochmals steigert (Haupt et al. 2025). Eine Studie in einem gemäßigten Wald in Deutschland zeigt zudem den Einfluss von Bewässerung auf die Vitalität der Bäume (Köhler et al. 2024): Unter langanhaltender Trockenheit im Jahr 2022, konnte die gezielte Bewässerung von Bäumen die vorzeitige Blattalterung reduzieren, den Vegetationszeitraum verlängern und somit die allgemeine Vitalität der Bäume im Folgejahr verbessern (ebd.). Unter Verbesserung der Vitalität sind in diesem Fall die Reduzierung von Trockenstressfolgen wie Blattschäden, hydraulische Dysfunktionen und erhöhte Mortalität gemeint (ebd.). Die Studie wurde jedoch für Bäume in einem Wald durchgeführt, weshalb die Befunde nicht unweigerlich auf Stadtbäume übertragbar sind. Trotz hervorgerufener Leistungsverbesserungen von Bäumen durch Bewässerung, ist diese Maßnahme mit einem hohen Ressourcen- und Personalaufwand verbunden, weshalb es nicht als dauerhafte, sondern vielmehr als unterstützende Maßnahme in Trockenperioden verwendet werden sollte (ebd.). Zudem ist eine bedarfsorientierte, gezielte Bewässerung unter Hitze- und Trockenstress sinnvoll (Haupt et al. 2025). Die Auswirkungen von Bewässerungsmengen und -intervallen können stark zwischen Baumarten, Standorten und klimatischen Bedingungen variieren (ebd.). Das unterstreicht die Wichtigkeit eines Monitorings der Bodenfeuchte und bedarfsgerechten Bewässerungsmaßnahmen. Insgesamt bestätigt die aktuelle Literatur, dass Bewässerung eine wirksame, aber ressourcenintensive kurzfristige Anpassungsmaßnahme darstellt, die vor allem in extremen Trockenperioden zur Sicherung der Leistungsfähigkeit urbaner Bäume eingesetzt werden kann.

Im Gegensatz zu Bewässerungsmaßnahmen stellt die Entsiegelung eine langfristige, strukturelle Maßnahme dar, welche die Standortbedingungen und die Ökosystemdienstleistungen urbaner Bäume nachhaltig verbessern kann (Nayanesh et al. 2024). Der Versiegelungsgrad hat einen nachweislichen Einfluss auf Wachstum, Vitalität und Leistungsfähigkeit der Bäume (ebd.). Das liegt daran, dass der Grad an Versiegelung insbesondere die Wasserverfügbarkeit im Boden, sowie den nutzbaren Wurzelraum und die Qualität des Substrates beeinflusst. Es konnte zudem herausgefunden werden, dass eine hohe Versiegelung die Evapotranspirationskühlung und das Baumwachstum deutlich negativ beeinflusst, was insbesondere auf die geringe Wasserverfügbarkeit und die eingeschränkten Wurzelräume zurückzuführen ist (Rötzer et al. 2021). Neben dem Hitze- und Trockenstress, stellen diese Eigenschaften weitere Stressfaktoren für Stadtbäume dar, die sich unter künftigen klimatischen Bedingungen weiter verschärfen werden (ebd.). In Bereichen mit einer geringen Versiegelung hingegen können Bäume höhere Wachstumsraten, stärkere Evapotranspirationsleistungen und eine bessere stomatäre Regulation aufweisen, was ihre mikroklimatische Wirksamkeit deutlich erhöht (Rötzer et al. 2021; Moser et al. 2018). Die Studie von

Moser et al. (2018) weist zudem darauf hin, dass sich die Auswirkungen von Versiegelungsgraden ebenfalls stark zwischen Baumarten und klimatischen Bedingungen unterscheiden können.

1.4 Hitzestress in der Stadt Speyer

Die Stadt Speyer ist eine 42,71 km² große kreisfreie Universitätsstadt in der Rheinland-Pfalz, welche von 49.564 Menschen bewohnt wird (Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz 2024). Sie gehört zu den am stärksten von Hitzestress betroffenen Kommunen in ganz Deutschland. Im Zeitraum von 2011 bis 2020 wurden dort durchschnittlich 23 Hitzetage pro Jahr mit Temperaturen über 30 °C gemessen, während im Zeitraum 1951 bis 1960 die Zahl der Hitzetage noch bei durchschnittlich 9,3 pro Jahr lag (GDV 2022). Auch außerhalb der Sommermonate zeigt sich ein deutlicher Erwärmungstrend in der Stadt Speyer. An der Messstation Waghäusel-Kirrlach ist die mittlere tägliche Höchsttemperatur vom 11. November bis 10. Dezember von 1985 bis 2025 um rund 2,1 °C angestiegen, was außergewöhnlich milde Temperaturen in den Wintermonaten zur Folge hat (Süddeutsche Zeitung 2025). Insbesondere in urbanen Bereichen, welche von einer hohen Versiegelung und hitzespeichernden Materialien geprägt sind, führen die klimatischen Veränderungen zu Hitzestress und damit bedingten Herausforderungen. Rund 63 % der Stadt Speyer sind durch Beton, Asphalt oder Gebäudestrukturen versiegelt (SWR 2024). Dadurch werden die Oberflächentemperaturen erhöht, welche die Bewohner*innen und Stadtbäume zunehmend belasten (Die Rheinlandpfalz 01.10.2024; Stadt Speyer 01.07.2025).

Als Reaktion auf diese Belastung hat die Stadt Speyer in den vergangenen Jahren Maßnahmen zur Hitzestressreduzierung getroffen. Beispielsweise hat die Kommune einen Hitzestadtplan erstellt, welcher es Bürger*innen ermöglicht kühlere Wege und Aufenthaltsorte zu wählen und die Standorte für Trinkwasserspender markiert (Stadt Speyer 2015). Außerdem wurde eine temporäre Begrünung am Domplatz installiert, die sogenannte Klimaoase, welche aus beschatteten Sitzmöglichkeiten, Pflanzen und einem Sprühwasservernebler besteht (SWR 05.06.2024). Zudem wurde die Aufstellung eines Hitzeaktionsplanes im Juli 2023 durch den Stadtrat beschlossen (Die Rheinlandpfalz 24.07.2023).

Zusätzlich zu den negativen Auswirkungen auf die Bevölkerung sind auch die Stadtbäume in Speyer von dem zunehmenden Hitze- und Trockenstress betroffen. Die Abteilung für Stadtgrün berichtet im Jahr 2024 von einer steigenden Zahl beschädigter Bäume im Stadtgebiet, wodurch im Winter desselben Jahres rund 300 Bäume gefällt werden sollten (Die Rheinpfalz 01.10.2024). Wie bereits die vorangehende Literaturrecherche zeigte, führen Hitze- und Trockenstress zu einem reduzierten Baumwachs-

tum, einer geringeren Vitalität, sowie einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Schädlingen und Krankheiten. Stadtbäume stellen jedoch auch wichtige Ökosystemdienstleistungen zur Reduktion von Hitzestress bereit. Durch Beschattungs- und Evapotranspirationskühlung, sowie Kohlenstoffspeicherung, leisten Stadtbäume einen wichtigen Beitrag zur Abkühlung des Mikroklimas und zur Stabilisierung städtischer Ökosysteme.

Deshalb stellt sich die Frage nach der idealen Anpassung des Stadtbaumbestandes in Speyer hinsichtlich der Optimierung ihrer Ökosystemdienstleistungen als Mitigationfunktion für den urbanen Hitzestress und die Sicherung des Baumwachstums. Ziel der Masterarbeit ist es folgende Forschungsfragen zu beantworten:

- *Wie ist der aktuelle Zustand des städtischen Baumbestands in Speyer charakterisiert und welche Ökosystemdienstleistungen (Beschattungs- und Evapotranspirationskühlung sowie Kohlenstoffbindung) erbringt er derzeit?*
- *Wie verändern sich die Ökosystemdienstleistungen des Baumbestands unter zukünftigen Klimaszenarien und in Extremjahren?*
- *Können Entsiegelungs- und Bewässerungsmaßnahmen die Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume unter aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen verbessern?*
- *Welche Ökosystemdienstleistungen stellen die Bäume am Domplatz zu aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen bereit?*
- *Können Entsiegelungs- und Bewässerungsmaßnahmen die Ökosystemdienstleistungen der Bäume am Domplatz unter zukünftigen Klimabedingungen verbessern?*

Ziel dieser Masterarbeit ist es, basierend auf Modellierungen, die aktuellen und zukünftigen Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume des Katasters in Speyer zu bestimmen und verschiedene Maßnahmen zu testen, einzeln und kombiniert, um diese zu optimieren. Die Ergebnisse sollen einen wissenschaftlichen Beitrag zur kommunalen Hitzeanpassung leisten und Handlungsempfehlungen zur resilienten Stadtentwicklung anbieten.

2. Material und Methoden

Um die zuvor beschriebenen Forschungsfragen zu beantworten, wird wie folgt vorgegangen. Zunächst wird das Baumkataster der Stadt Speyer von der Kommune ergänzt und erweitert, sodass es im darauffolgenden Schritt für die Simulation mit dem City-Tree Model vorbereitet werden kann. Die Vorbereitung beinhaltet unter anderem die Zuteilung der Baumarten aus dem Kataster zu einer der zwölf im Modell verfügbaren Baumarten, hinsichtlich ihrer Ähnlichkeit bezüglich Trockenheits- und Beschattungstoleranz. Zudem werden Berechnungen der fehlenden Baumparameter, sowie der Kronenlänge (cl), der Kronendurchmesser (d) und der Stammdurchmesser (dbh) durchgeführt.

Nachdem die Daten aufbereitet wurden, kann mit der Modellierung des Wachstums und der Ökosystemdienstleistungen im CityTree Model begonnen werden. Die Simulationen werden im nachfolgenden Kapitel genauer erläutert. Die Ergebnisse werden mit den Programmen Excel und QGIS analysiert, interpretiert und die Forschungsfragen beantwortet.

2.1 Baumkataster der Stadt Speyer und Berechnung fehlender Werte

Das Baumkataster der Stadt Speyer besteht sowohl aus manuell erfassten Katastereinträgen, als auch mit Satellitendaten in der Kartensoftware QGIS erfassten und verarbeiteten Einträgen. Für die Bäume, welche im Kataster enthalten sind, liegen der Standort, die Baumart, das Erhebungsdatum, sowie lückenhaft das Pflanzjahr vor. Der Stammdurchmesser liegt für etwa 150 Bäume vor. Es fehlen somit zentrale baumspezifische Parameter, welche für die Simulationen mit dem CityTree Modell erforderlich sind. Dazu gehören der Stammdurchmesser auf Brusthöhe (dbh in cm), die Baumhöhe (h in m), die Kronenprojektionsfläche (CPA in m²). Zudem werden weitere Informationen zu den Baumstandorten, in Form von Versiegelung (SS in %), der Feldkapazität (FK) und dem permanenten Welkepunkt (PWP) des Bodens, sowie des Sky View Factors (SVF) benötigt.

Um die benötigte Datengrundlage für die Simulationen zu ergänzen und vorzubereiten, hat die Stadt Speyer umfangreiche Vorarbeit geleistet. Da die manuelle Erfassung dieser Baumparameter mit hohem Personalaufwand und Kosten verbunden ist, wurden fehlende Daten mit Hilfe von Fernerkundungsdaten erfasst. Die Informationen zur Vorgehensweise wurden von der Stadt Speyer zur Verfügung gestellt und nachfolgend beschrieben. Zunächst wurden die Bäume, die nicht im Kataster aufgeführt waren mit Hilfe von Satellitendaten in QGIS erfasst. Dafür wurde ein Plugin namens *deepness* verwendet, welche basierend auf einem Erkennungsmodell namens *YOLOv9* die Baumkronen im Stadtgebiet erkennt und markiert (QGIS 2025). Mit einem Orthofoto der Stadt Speyer und dem Plugin wurden fehlende Baumkronen erkannt. Der Datensatz wurde mit dem bestehenden Kataster abgeglichen und bereits erfasste

Bäume aus dem Datensatz entfernt. Die trainierte Baumerkennungsanwendung funktioniert jedoch nicht fehlerfrei. Teilweise wurden Objekte wie Autos oder Hausdächer als Bäume erkannt. Diese wurden mit einem Color Infrared Images (CIR) identifiziert. Infrarotaufnahmen zeigen Vegetation vorwiegend rot an und unterscheiden sich visuell stark von anderen Oberflächen (s. Abb. 1). Dieser Farbkontrast wurde genutzt, um eine Layermaske zu erstellen, welche die fehlerhaft klassifizierten Objekte aus dem Datensatz entfernte. Weitere fehlerhafte Klassifizierungen befanden sich auf Vegetationsflächen. Um diese Fehlerquelle zu beheben, wurde der Datensatz mit dem Höhenmodell abgeglichen und in einem Radius von 5 m nach einer maximalen Höhe des erkannten Objektes unter 1,5 m gefiltert. Darunter waren beispielsweise Büsche und Sträucher.

Das zuvor beschriebene Höhenmodell wurde aus zwei öffentlich zugänglichen Datensätzen berechnet, einem digitalen Geländemodell (DGM) und einem digitalen Oberflächenmodell (DOM) (Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation 2025 (1) und (2)). Beide haben eine Auflösung von einem Meter und sind durch Laserscannerbefliegungen entstanden.

Beide Geodatensätze stellen unterschiedliche Bereiche der Erdoberfläche dar. Ein DGM erfasst die räumliche Form der Erdoberfläche ohne die Objekte auf der Oberfläche. In einem DOM hingegen sind Objekte, welche sich auf der Erdoberfläche befinden sichtbar. Um alle Objekte auf der Erdoberfläche mitsamt ihrer Höhe als Datensatz zu bekommen, wurden die Rasterdatensätze voneinander abgezogen (DOM-DGM). Das Ergebnis ist auf Abb. 1 zu sehen.

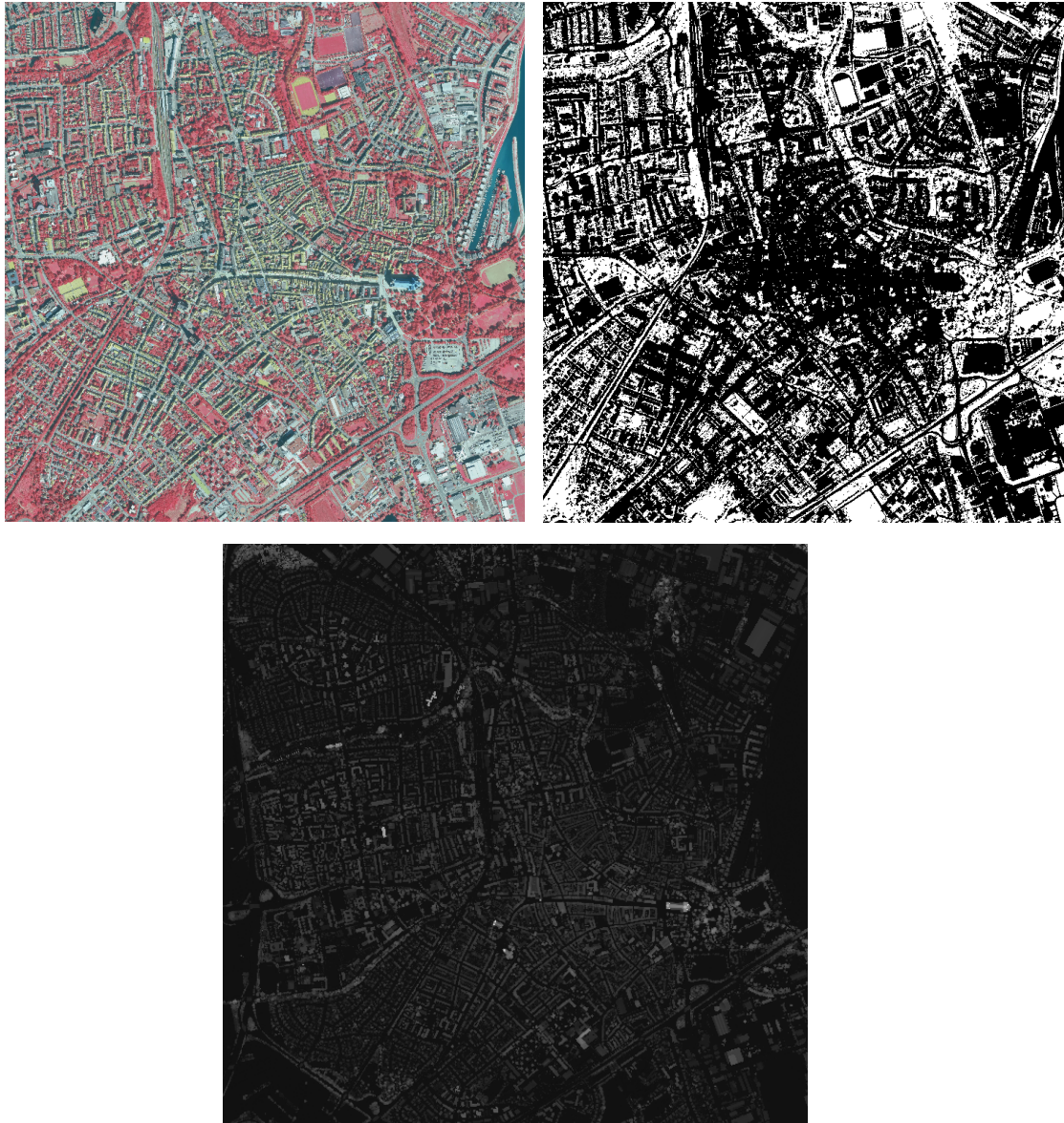


Abb. 1 Auszug aus Color Infrared Images (CIR) Stadt Speyer in den oberen beiden Darstellungen (Geoportal 2025). Datensatz zu Objekthöhen in Speyer durch die Rasterrechnung DOM-DGM (Stadt Speyer 2025) in der unteren Abbildung.

Zudem wurde die Kronenprojektionsfläche (CPA in m^2) als ein weiterer baumspezifischer Parameter berechnet. Dieser wurde basierend auf Punktdaten der Baumstandorte und des Höhenrasters erstellt.

Für jeden Baum wurde ausgehend vom Stamm ein Höhenprofil in 36 Richtungen (alle 10°) mit einer maximalen Distanz von 15 m erzeugt. Diese Profile zeigen die Abnahme der Höhe mit zunehmender Entfernung vom Stamm. Sobald die Höhe in einer Richtung um mehr als 45 % unter die Baumhöhe gefallen ist, wurde das als Ende der Baumkrone gewertet. Der Mittelwert aller Radien ergab dann den Radius der Krone, welcher in eine Kreisfläche umgerechnet wurde (CPA). Um Überlappungen zu vermeiden, wurden die Daten daraufhin in zwei Schritten bereinigt. Zunächst wurden alle

Polygone paarweise verglichen. Wenn sich zwei Kronenflächen zu mehr als 50 % überschneiden, wurde der Baum mit der geringeren Höhe aus dem Datensatz entfernt. Somit kann verhindert werden, dass ein Kronenbereich doppelt oder übermäßig in den Daten repräsentiert wird. Es blieben jedoch manche Kronenflächen im Datensatz, welche von mehreren Baumkronen überlagert wurden. Diese Herausforderung wurde durch eine effizienzbasierte Bereinigung gelöst. Es wurden stark überlappende Baumkronen identifiziert und darin lediglich das Polygon erhalten, welches die geringsten Überlappungen besitzt. Wurde ein Polygon zu mehr als 30 % von seiner Fläche vom effizienzbasierten Polygon überdeckt, wurde es aus dem Datensatz entfernt. Die Effizienz E_i jedes Polygons i wurde definiert als:

$$E_i = CPA_i - \sum A_{ij}$$

CPA beschreibt die Fläche des Polygons i und A_{ij} die Überlappungsfläche mit anderen Polygonen j . Um die Vermeidung einer mehrfachen Berücksichtigung sich weiterhin überlappender Baumkronen zu verhindern, wurden diese Flächen zunächst zusammengelegt. Um die Gesamtfläche einer solchen verschmolzenen Fläche entsprechend auf die darin enthaltenen Einzelbäume zu verteilen, wurde ein gewichtungsbasiertes Verfahren gewählt. Die Grundlage für die Gewichtung bildet die Höhe der Bäume. Für jede verschmolzene Fläche wurde zunächst die Summe aller Baumhöhen gebildet. Anschließend wurde der prozentuale Anteil jedes Baumes an dieser Summe bestimmt und dementsprechend zugeteilt. Die auf diese Weise berechnete Fläche der Bäume A_i wurde mit folgender Formel berechnet:

$$A_i = \left(\frac{h_i}{\sum_{j=1}^n h_j} \right) \cdot A_{gesamt}$$

A_i : die dem Baum i zugewiesene Fläche

h_i : die Höhe des Baumes i

n : Anzahl Bäume

$\sum_{j=1}^n h_j$: die Summe der Höhen aller n Bäume innerhalb der verschmolzenen Fläche

A_{gesamt} : die Gesamtfläche der verschmolzenen Fläche

Alle Bäume, die keine Überlappung mit weiteren Kronenprojektionsflächen aufweisen, behielten ihre ursprüngliche CPA, da der Term in der Klammer zu 1 wird, sobald lediglich ein Baum im betrachteten Polygon vorkommt.

Daraufhin wurden weitere Standorteigenschaften bestimmt. Zunächst wird die Berechnung der Versiegelung unter den Bäumen beschrieben. Die Auflösung der Grundlegenden Versiegelungsdaten von Copernicus beträgt 10x10 m (Copernicus 2018). Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde der Datensatz zunächst auf 1x1 m hochskaliert und die 5 m Puffermethode um jeden Baum angewendet. Die Skalierung führt jedoch zu einer Verzerrung der Daten, da keine realen Werte zum Datensatz

hinzukommen und die entstehenden Lücken lediglich rechnerisch gefüllt werden. Zudem wäre es sinnvoll die Bäume, welche sich in einer Pflanzgrube befinden, zu markieren und gesondert zu behandeln, da dort das Baumpflanzsubstrat Typ A verwendet wurde und allgemein bessere Standortbedingungen vorzufinden sind. Jedoch wurden die Pflanzgruben nicht dokumentiert und eine genaue Zuordnung mittels QGIS ist nicht ohne größere Verzerrung der Daten möglich. Auch die Zuordnung von Größe und Substrat der Pflanzgruben ist nicht möglich.

Desweiteren wurden die Feldkapazität und der Welkepunkt der Böden in Speyer mit Hilfe des WMS-Dienstes bestimmt (Landesamt für Geologie und Bergbau 2025).

Schließlich wurde der Sky View Factor (SVF) der Bäume basierend auf dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) berechnet. Dafür wurde das *Terrain Shading Plugin* verwendet. Der Mittelwert der berechneten SVF wurde daraufhin auf die Baumpunkte übertragen. Alle Bäume mit SVF unter 0,2 wurden aussortiert, da es sich dabei mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht um Bäume handelt.

Nachdem alle fehlenden Parameter bestimmt wurden, wurde das Baumkataster nochmal gefiltert, sodass nur öffentliche Bäume dargestellt werden. Bei der Filterung wurde der Baumdatensatz mit einer Polygondatei abgeglichen, die alle Straßen und Wege Speyers, sowie Grundstücke, die der Stadt gehören, abbildet. Alle Bäume, welche nicht auf dieser Fläche standen, wurden entfernt. Von diesen 19.464 Bäumen auf öffentlichem Grund, sind 9.777 aus dem ursprünglichen Kataster und wurden einer Baumart zugeordnet.

2.2 Baumartenzuordnung

Um lediglich die Bäume zu erhalten, welche für eine Modellierung mit dem CityTree Model in Frage kommen, wurde das gelieferte Baumkataster der Stadt Speyer nachbearbeitet. Alle Arten welche Konifere oder Sträucher sind, wurden aus dem Datensatz entfernt, da diese nicht im Modell simuliert werden können. Der daraus resultierende Datensatz beinhaltet 9.232 Bäume.

Die Simulation im CityTree Model kann für die in Tab.1 dargestellten zwölf Baumarten durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden die andersartigen Bäume einer dieser zwölf Baumarten zugeordnet. Die Vorgehensweise der Baumartenzuordnung basiert auf der Publikation von Niinemets und Valladares aus dem Jahr 2006, welche die mittlere Schatten- und Trockenheitstoleranz ausgewählter Baumarten beschreibt. Basierend auf der Ähnlichkeit der Toleranzwerte werden die Baumarten, welche nicht im CityTree Model vorkommen, einer der zwölf Arten zugeordnet. Wenn für eine Baumart aus dem Kataster der Stadt Speyer keine Toleranzwerte aus der Publikation vorhanden sind, wird die Art hinsichtlich der Ähnlichkeit in Morphologie (Erscheinungsbild) und des Schattenwurfes einer der zwölf Baumarten zugeteilt. Die Zuordnung der Baumarten aus dem Kataster der Stadt Speyer wird in der Tabelle im Anhang 1 dokumentiert.

Tab. 1 Im CityTree Model parametrisierte Baumarten mit Zuordnungsnummer, wissenschaftlicher und deutscher Bezeichnung, sowie deren Toleranz gegenüber Trockenheit und Beschattung nach Niinemets and Valladares aus dem Jahr 2006.

Im CityTree Model parametrisierte Baumarten			Toleranz (Niinemets and Valladares 2006)	
Nummer	Wissenschaftlicher Name	Deutscher Name	Trockenheit	Beschattung
1	<i>Tilia cordata</i>	Winterlinde	2,75	4,18
2	<i>Robina pseudoacacia</i>	Robinie	4,11	1,72
3	<i>Platanus x acerifolia</i>	Ahornblättrige Platane	3,35	3,00
4	<i>Aesculus hippocastanum</i>	Gewöhnliche Roskastanie	2,82	3,43
5	<i>Acer platanoides</i>	Spitzahorn	2,73	4,20
6	<i>Acer pseudoplatanus</i>	Bergahorn	2,75	3,73
7	<i>Fraxinus excelsior</i>	Gemeine Esche	2,50	2,66
8	<i>Betula pendula</i>	Hängebirke	1,85	2,03
9	<i>Fagus sylvatica</i>	Rotbuche	2,40	4,56
10	<i>Populus nigra 'Italica'</i>	Italienische Schwarzpappel	2,20	2,46
11	<i>Quercus robur</i>	Steileiche	2,95	2,45
12	<i>Carpinus betulus</i>	Hainbuche	2,66	3,97

Zudem wird eine fehlende Größe der Bodeneigenschaften ermittelt. Für die Simulation im CityTree Model wird die nutzbare Feldkapazität (nFk) benötigt. Dafür wird die Feldkapazität (Fk) von dem permanenten Welkepunkt (PWP) subtrahiert.

2.3 Allometrische Gleichungen

Es gibt zudem weitere Parameter, welche für das CityTree Model benötigt werden, darunter die Kronenlänge (cl), der Kronendurchmesser (d) und der Stammdurchmesser (dbh).

Durch die Stadt Speyer wurden die Baumhöhe und die Kronenprojektionsfläche der Bäume ermittelt. Daraus kann die Kronenlänge rechnerisch annähernd abgeleitet werden. Basierend auf einem vollständigen Datensatz der Parameter von Bäumen in München (Rötzer 2025) wurden folgende inverse Gleichungen abgeleitet:

$$cl = \exp (a + b * \ln(h) + \ln(cr))$$

cl: Kronenlänge (cm)
h: Baumhöhe (m)
cr: Kronenradius (m)
a, b, c: Artenspezifische Koeffizienten

Die je nach Baumart variierenden Koeffizienten werden in der Formel als a, b und c berücksichtigt und in Tab. 2 dargestellt. Diese wurden für insgesamt 17 Baumarten anhand einer multiplen Regressionsanalyse ermittelt. Der Wert *Intercept* wird als Koeffizient a, *ln(h)* als Koeffizienten b und *ln(cr)* als c in der Formel verwendet. Die individuelle Berechnung der Stammdurchmesser und Kronenlänge ist nicht für alle Baumarten der Stadt Speyer möglich, wird jedoch für alle im CityTree Model vorkommenden Arten und fünf weiter häufig vorkommende Baumarten berechnet.

Tab. 2 Koeffizienten nach Baumart, welche für die Berechnung der Kronenlänge benötigt werden. Berechnet mit multiplen Regressionsanalysen von Baumdaten aus München (Rötzer 2025) für alle CityTree Model-Baumarten k.A. = keine Angabe (Berechnet von Rötzer 2025) und fünf weitere Baumarten (selbst berechnet, basierend auf Daten von Rötzer 2025).

Baumart	Kronenlänge (cl)			r ²
	Schnittpunkt (a)	ln(h) (b)	ln(CPA) (c)	
<i>Tilia cordata</i>	- 0,9501595	1,17446932	0,03859118	k.A.
<i>Robina pseudoacacia</i>	- 1,0423587	1,15766063	0,0572923	k.A.
<i>Platanus x acerifolia</i>	- 1,0223723	1,11586173	0,09207733	k.A.
<i>Aesculus hippocastanum</i>	- 0,8780322	1,14827913	0,05091102	k.A.
<i>Acer platanoides</i>	- 0,8436882	1,12329385	0,05579086	k.A.
<i>Acer pseudoplatanus</i>	- 1,0005593	1,2162354	0,03617006	k.A.
<i>Fraxinus excelsior</i>	- 0,7984667	1,12815577	0,03936124	k.A.
<i>Betula pendula</i>	- 0,7870531	1,15728241	0,01175787	k.A.
<i>Fagus sylvatica</i>	- 0,3883275	1,0170412	0,02649445	k.A.
<i>Populus nigra 'Italica'</i>	0	0,91005181	0,03663939	k.A.
<i>Quercus robur</i>	- 0,61463228	1,11542383	0,00784386	k.A.
<i>Carpinus betulus</i>	- 0,5957908	1,0485474	0,07060767	k.A.
<i>Acer campestre</i>	- 0,8796564	1,2098315	0,06733013	0,975
<i>Corylus colurna</i>	- 0,8254862	0,00100715	1,18283202	0,958
<i>Gleditsia triacanthis</i>	- 0,8678235	1,21859211	- 0,0186929	0,962
<i>Prunus avium</i>	- 0,9320721	1,1946522	0,06186582	0,970
<i>Sorbus aria</i>	- 1,0630289	1,29244977	0,04937852	0,976

Die Kronenlänge wird dementsprechend für fünf weitere Baumarten, welche häufig in der Stadt Speyer vorkommen, basierend auf den Daten der Münchner Bäume berechnet (s. Tab. 2). Die Koeffizienten werden mit einer multiplen Regressionsanalyse ermittelt, wobei x der Baumhöhe und dem Kronenradius und y der Kronenlänge entspricht.

Zudem kann basierend auf der bereitgestellten Baumhöhe und dem Kronenradius der Stammdurchmesser auf Brusthöhe (dbh) rechnerisch annähernd ermittelt werden.

Dieser wurde für die zwölf Baumarten des CityTree Models mit folgender Formel berechnet, welche ebenfalls auf den abgeleiteten inversen Gleichungen Münchner Bäume beruht:

$$dbh = \exp(a + b * \ln(h) + c \ln(cr))$$

cr: Kronenradius (m)

h: Baumhöhe (m)

a, b, c: Artenspezifische Koeffizienten

Die für diese Formel benötigten Koeffizienten der CityTree Model-Baumarten sind in Tab. 3 zu sehen. Die Koeffizienten werden durch eine multiple Regressionsanalyse mit x als Baumhöhe und dem Kronenradius und y als Stammdurchmesser ermittelt.

Tab. 3 Koeffizienten nach Baumart, welche für die Berechnung des Stammdurchmessers (dbh) benötigt werden. Berechnet mit multiplen Regressionsanalysen von Baumdaten aus München (Rötzer 2025) für alle CityTree Model-Baumarten, k.A. = keine Angabe (Berechnet von Rötzer 2025) und fünf weitere Baumarten (selbst berechnet, basierend auf Daten von Rötzer 2025)

Baumart	Stammdurchmesser (dbh)			r ²
	Schnittpunkt (a)	ln(h) (b)	ln(CPA) (c)	
<i>Tilia cordata</i>	0,85024095	0,53510302	0,31479906	k.A.
<i>Robina pseudoacacia</i>	0,13083655	0,79878359	0,31962128	k.A.
<i>Platanus x acerifolia</i>	0,2732286	0,88322212	0,31559189	k.A.
<i>Aesculus hippocastanum</i>	0,86504341	0,52445733	0,37697904	k.A.
<i>Acer platanoides</i>	0,63855004	0,53661518	0,3620043	k.A.
<i>Acer pseudoplatanus</i>	0,53509228	0,70131643	0,28437157	k.A.
<i>Fraxinus excelsior</i>	0,59554003	0,50661794	0,39806745	k.A.
<i>Betula pendula</i>	0,70264953	0,71823599	0,20303083	k.A.
<i>Fagus sylvatica</i>	0,5864311	0,57610408	0,3419809	k.A.
<i>Populus nigra 'Italica'</i>	- 0,1945528	0,96335857	0,32855871	k.A.
<i>Quercus robur</i>	0,63354352	0,73669873	0,23897957	k.A.
<i>Carpinus betulus</i>	0,88962583	0,35292419	0,41683996	k.A.
<i>Acer campestre</i>	0,22029259	1,02073565	0,376801	0,87
<i>Corylus colurna</i>	0,62407519	0,26652041	0,95422966	0,81
<i>Gleditsia triacanthis</i>	- 0,2528183	1,2539838	0,17422957	0,96
<i>Prunus avium</i>	0,36393325	0,93116168	0,43622274	0,84
<i>Sorbus aria</i>	- 0,2170404	1,42921165	0,15711612	0,84

Zudem wird der Kronendurchmesser (d) der Stadtbäume, basierend auf den Kronenprojektionsflächen, rechnerisch ermittelt. Da bei den Berechnungen der CPA von einem Kreis ausgegangen wurde, können die Berechnungen des Durchmessers anhand folgender Formel durchgeführt werden:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{CPA}{\pi}}$$

d: Kronendurchmesser (m)

CPA: Kronenprojektionsfläche (m²)

Alle Parameter (cl, dbh und d) wurden außerdem für sieben Bäume der Art *Platanus x acerifolia* am Fokusort Domplatz, berechnet. Diese wurden zusätzlich für die Analyse am Domplatz aufgenommen, um eine höhere Anzahl Bäume aus dem CityTree Model für die Simulationen verwenden zu können und somit genauere Analyseergebnisse zu erhalten.

2.4 Analyse der Baumkatasterdaten

Da die Stadt Speyer aktuell bereits stark von Hitzestress betroffen ist und im Zuge des Klimawandels mit einer weiteren Zunahme von Trockenperioden zu rechnen ist, wird die Trockenheitstoleranz der vorkommenden Baumarten als Grundlage für weitere Analysen eingehend betrachtet. Die Zuordnung der Baumarten basiert auf den Angaben aus Niinemets und Valladares (2006). Wurde eine Baumart nicht in der Publikation geführt, so wurden die Werte der zugeteilten Baumart für das CityTree Model übernommen. Die Werte der Trockenheitstoleranz wurden wie folgt für die jeweilige Baumart kategorisiert: hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2 .

Weiterführende Analysen des Baumkatasters wurden mit den Programmen Excel und QGIS durchgeführt.

17

2.5 Modellierung der Stadtbäume - Wachstumsmodell CityTree

Baummodellierungsprogramme sind meist für die Simulation von Waldbeständen vorgesehen, oder wurden für spezifische Klimate erstellt. Dazu zählt das empirische Stadtbaumsimulationsprogramm Modell *i-Tree*, welches für Amerika und Großbritannien mehrfach getestet wurde. Das prozessbasierte *CityTree Model* hingegen ist ein Modell, welches basierend auf Daten deutscher Stadtbäume in temperierten Klimaten entwickelt wurde. (Leichtle et al. 2024) Dafür wurden über 5.000 Bäume von 12 häufig vorkommenden Arten vermessen (Rötzer et al. 2024). Das Modell berechnet Wachstum und Ökosystemdienstleistung einzelner Stadtbäume in Abhängigkeit von Klima- und Umgebungsbedingungen mit Hilfe von biologischen, chemischen und physikalischen Gleichungen (Rötzer et al. 2019). Die Rechenschritte werden mithilfe von Excel-Tabellenkalkulation und Python durchgeführt (ebd.). Das Modell CityTree ist modular aufgebaut. Darunter sind die Module Klima, Wasserhaushalt, Photosynthese, Allokation, Kühlung und Beschattung zu nennen (ebd.). Das Modul Allokation berechnet den gebildeten Kohlenstoff (bzw. den Biomassezuwachs) in den verschiedenen

Bereichen des Baumes, wodurch die Veränderungen der Baumdimensionen abgeleitet werden können (Wachstum). Das Kühlungsmodul berechnet die durch Transpiration freigesetzte Energie in kWh. Zudem wird die Kühlung durch Beschattung über das Lambert-Beersche Gesetz abgeleitet. Die Beschattung wird im gleichnamigen Modul bestimmt. Dafür werden die Schattenfläche- und dichte der Baumkrone berechnet.

Für die Simulation mit dem CityTree Model müssen die Baum- und Bodeneigenschaften jedes Baumes, sowie die Klimabedingungen des Standortes angegeben werden. Die klimatischen Bedingungen werden in Form von monatlichen Strahlungs- und Temperaturwerten, sowie der Windgeschwindigkeit, des Niederschlages und der relativen Luftfeuchte für den jeweiligen Baumstandort beschrieben (Leichtle et al. 2024). Die Klimadaten der jeweiligen Stadt werden dem (PIK 2017) entnommen. Die Bodeneigenschaften werden mit den Parametern Bodenart, Feldkapazität, permanenter Welkepunkt und der Durchwurzelungstiefe definiert (Rötzer et al. 2024). Baumspezifische Eingangsparameter wie die Art, Stammdurchmesser, Höhe und Kronendimensionen werden für die Simulation benötigt (ebd.). Der Stammdurchmesser der Individuen wird für das Model einer der zehn Klassen zugeteilt (s. Tab. 4). Bei der Simulation kann zwischen vier Klimabedingungen gewählt werden, dem langjährigen Mittel, dem Trockenjahr und vier RCP-Szenarien (2.6, 4.5, 6.0, 8.5). Diese sind Representative Concentration Pathways (RCP's) welche in den IPCC-Klimaberichten verwendet werden, um verschiedene zukünftige Entwicklungen zu beschreiben (IPCC 2023).

Tab. 4 Im CityTree Model verwendete Stammdurchmesserklassen. Die Stadtbäume des Katasters werden für die Simulation einer der zehn Klassen zugeteilt.

Durchmesserklasse	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Durchmesser (cm)	< 10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	90-100	> 100

2.6 Simulationsgrundlagen

Die Ökosystemdienstleistungen und das Wachstum der Bäume in Speyer werden unter vier verschiedenen Klimaszenarien simuliert: dem langjährigen Mittel, dem Trockenjahr, dem RCP 2.6 und dem RCP 8.5. Die Klimabedingungen der Stadt Speyer basieren auf Grund von mangelnden Daten auf den Werten der nahe gelegenen Stadt Frankfurt (PIK 2017). Jene Klimabedingungen werden in Abb. 2 für die verschiedenen Szenarien dargestellt (eigene Zusammenstellung nach ZSK 2024).

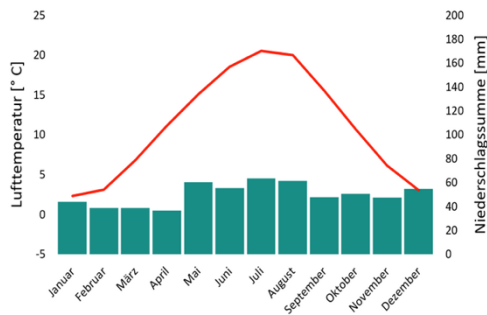
Die Simulation des langjährigen Mittels umfasst den Zeitraum zwischen den Jahren 1991 und 2020 und wird im Rahmen dieser Arbeit als die Simulation unter aktuellen Klimabedingungen verwendet. Das Szenario umfasst eine mittlere Jahrestemperatur von 11,1 °C und einen mittleren Niederschlag von 598 mm, welcher über die Monate hinweg relativ gleichverteilt ist. Die CO₂-Konzentration beträgt 400 ppm.

Zudem werden zwei zukünftige Klimaszenarien simuliert. Das RCP 2.6- und das RCP 8.5-Szenario werden näher betrachtet. Die Szenarios basieren auf dem Modell Had-GEM2, welches umfangreiche Kreislaufprozesse der Atmosphäre, Land, Ozean und Kohlenstoff für Wechselwirkungen und Rückkopplungen berücksichtigt (Rötzer et al. 2024).

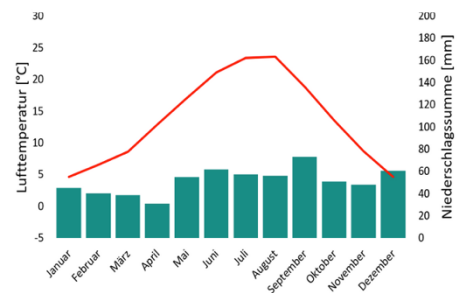
Das Klimaszenario 2.6 beschreibt eine ambitionierte Zukunft im Zeitraum von 2041 bis 2050, welche von einer effektiven Klimaschutzpolitik geprägt ist. In diesem Szenario steigt die Treibhausgaskonzentration bis 2050 an und sinkt daraufhin um $2,6 \text{ Wm}^{-2}$ bis ins Jahr 2100 (IPCC 2023; Rötzer et al. 2024). Der Niederschlag in Frankfurt beträgt in diesem Szenario im Mittel 602 mm und es herrscht eine im Vergleich zum langjährigen Mittel erhöhte mittlere Temperatur von $13,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die CO_2 -Konzentration beträgt 440 ppm (ZSK 2024; PIK 2017).

Das Klimaszenario RCP 8.5 beschreibt eine pessimistische Zukunft im Zeitraum von 2041 bis 2050, welche eine Klimapolitik mit geringer Anpassung entspricht und den höchsten Anstieg des globalen Strahlungstriebes von $8,5 \text{ W m}^{-2}$ bis ins Jahr 2100 zu verzeichnen hat (Rötzer et al. 2024). Die CO_2 -Konzentration in Frankfurt beträgt 520 ppm, während eine mittlere Jahrestemperatur von $14,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und ein mittlerer Niederschlag von 605 mm erwartet wird (ZSK 2024; PIK 2017).

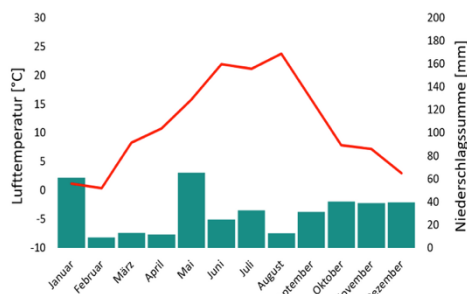
Zudem wird ein Trockenjahr simuliert, welches auf den Daten des europaweit stärksten Trockenjahres der letzten 50 Jahre im Jahr 2003 basiert. Dabei sind insbesondere von Februar bis April und Juni bis September geringe Niederschlagsmengen zu verzeichnen. Im Mittel werden 379 mm Niederschlag und eine Temperatur von $11,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ simuliert. Die CO_2 -Konzentration beträgt 400 ppm (ZSK 2024; PIK 2017).



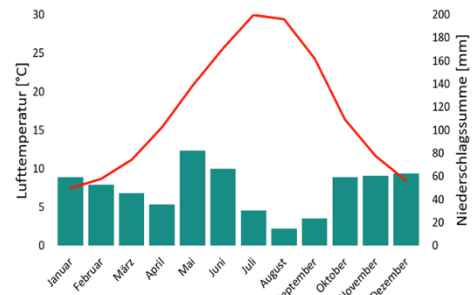
Langjähriges Mittel (1991-2020)



RCP 2.6



Trockenjahr (2003)



RCP 8.5

Szenario	Jahr	CO ₂ - Konz. (ppm)	Temp. (°C)	Niederschl. (mm)	Strahlung (J/cm ³)	Windgeschwind. (m/s)	Feuchtigk. (%)
Langjähriges Mittel	1991 - 2020	400	11,1	598	1.027	3,3	74
Trockenjahr	2003	400	11,4	379	1.148	3,1	70
RCP 2.6	2041 - 2050	440	13,5	602	1.084	3,1	71
RCP 8.5	2041 - 2050	520	14,1	605	1.095	3,1	70

Abb. 2 Klimabedingungen der Stadt Frankfurt unter verschiedenen Klimaszenarien. Diese Klimadaten werden für die Simulationen der Stadtbäume in Speyer verwendet, da keine hinreichend langen Klimazeitreihen für die Stadt Speyer verfügbar sind (eigene Darstellung. Datengrundlage: ZSK 2024). Rote Linie = mittlere Temperatur (°C), blaue Balken = durchschnittlicher Niederschlag (mm).

Nachdem die Ökosystemdienstleistungen unter den verschiedenen Klimaszenarien betrachtet und verglichen sind, werden Anpassungsmaßnahmen für stark versiegelte Bäume (ab 60 %) simuliert, um das Wachstum und die Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen und zukünftigen Bedingungen zu unterstützen. Darunter sind Entsiegelungs- und Bewässerungsszenarien zu nennen, welche unter dem langjährigen Mittel und RCP 8.5-Szenario simuliert werden. Verschiedene Entsiegelungsgrade werden mit einer Reduktion um 20, 30 und 50 Prozentpunkte (P. p.) getestet. Zudem werden unterschiedliche Bewässerungsmengen mit 80, 125 und 250 Liter pro Baum und Woche (l/Baum/Woche) für die Monate Juni bis August simuliert. Zuletzt werden zwei Kombinationsmaßnahmen aus Entsiegelung und Bewässerung getestet. Diese setzen sich aus einer Entsiegelung um 50 Prozentpunkte und einer Bewässerung von 80 l pro

Baum und Woche, sowie einer Entsiegelung um 50 P. p. und einer Bewässerung von 250 l pro Baum und Woche zusammen.

Am Fokusstandort Domplatz werden die Szenarien für Bäume mit einer hohen Versiegelung (12 Individuen) und dem Gesamtbestand (24 Individuen) simuliert. Die Ökosystemdienstleistungen und das Wachstum werden unter verschiedenen Klimaszenarien (langjähriges Mittel und dem RCP 8.5) für alle Bäume und für die Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % simuliert. Daraufhin werden dieselben Anpassungsmaßnahmen im pessimistischen Klimaszenario getestet, wie zuvor bei der gesamten Stadt (Entsiegelung um 20, 30, 50 Prozentpunkte, Bewässerung von 80, 125, 250 l pro Baum und Woche). Zusätzlich werden kombinierte Maßnahmen ebenfalls unter dem pessimistischen Klimaszenario, sowohl für die stark versiegelten Bäume (ab 60 %), als auch für den Gesamtbestand getestet.

2.7 Simulierte Ökosystemdienstleistungen

Für die Analyse der Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume in Speyer wird der Fokus auf die Evapotranspirationskühlung in Kilowattstunden (kWh) in den Sommermonaten Juni bis August, sowie dem Biomassezuwachs in Kilogramm Trockengewicht pro Baum und Jahr (kg Tg/Baum/a) gelegt. Etwa die Hälfte des Biomassezuwachses ist Kohlenstoff, weshalb durch diese Größe auch die Kohlenstoffbindung beschrieben werden kann.

21

Die Beschattungskühlung in Kilowattstunden (kWh) in den Sommermonaten Juni bis August wird im Rahmen dieser Arbeit lediglich oberflächlich behandelt. Die Leistung unter aktuellen Klimabedingungen (langjähriges Mittel) im Vergleich zu den zukünftigen Klimaszenarien wird analysiert und dargestellt. Dieser Vergleich soll verdeutlichen, dass die Beschattungskühlung bei zunehmender Strahlungsintensität unweigerlich zunimmt, unabhängig von Wasserverfügbarkeit oder physiologischem Stress der Bäume. Das ist auf die Berechnungsart durch das Modell mit dem Lambert-Beerschen Gesetz zurückzuführen. Auch ein potentieller Verlust von Blättern infolge von Hitze-stress und die damit verbundene Verringerung der Beschattung durch die Baumkrone ist im CityTree Modell nicht berücksichtigt. Aus diesen Gründen wird der Effekt der Maßnahmen auf die Beschattungskühlung nicht weiter thematisiert.

Für die Gesamteffekte wird zudem das Abflussverhalten betrachtet. Die Ausgabe des Abflusses im Modell wird in mm angegeben. Um das Ergebnis auf die gesamte Fläche des Baumes zu beziehen, werden die Werte mit der Kronenprojektionsfläche multipliziert.

3 Wachstum und Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume in Speyer

3.1 Aktueller Baumbestand

Charakterisierung des Baumbestandes

Insgesamt sind im Baumkataster der Stadt Speyer 19.462 Bäume gelistet, wovon 9.232 Bäume für die Simulation mit dem CityTree Model verwendet werden können. Das entspricht 47 % der gelisteten Stadtbäume. Die Bäume für die Simulation stehen auf öffentlichem Grund und sind einer Baumart zugeteilt. Im Folgenden bezieht sich der Baumbestand der Stadt Speyer auf die 9.232 Bäume, welche für die Simulationen verwendet werden können. Zunächst werden die strukturellen Eigenschaften des Baumbestandes für diese Bäume dargestellt.

Den 9.232 Bäumen sind 303 verschiedene Baumarten zuzuordnen, wovon 202 Baumarten (6,3 %) mit unter 10 Individuen vertreten sind. Die 30 am häufigsten vorkommenden Baumarten entsprechen 72 % aller Bäume, während die 15 häufigsten Baumarten 54 % aller Bäume entspricht. In Tab. 5 sind die Baumanzahl (N), Trockenheitstoleranz, der Stammdurchmesser (dbh), die Höhe (H) und der Sky View Factor (SVF) in Form des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten angegeben. Die Baumarten sind nach der Anzahl des Vorkommens sortiert und im CityTree Modell vorkommende Arten sind grün markiert. Die Darstellung soll einen ersten Überblick über den Großteil der Bäume in Speyer geben. Die zwei am häufigsten vorkommenden Baumarten sind *Quercus robur* mit 6,4 % und *Acer pseudoplatanus* mit 5,1 %. Beide sind im CityTree Model als Arten gelistet. Einige Arten haben große durchschnittliche Stammdurchmesser, darunter *Aesculus hippocastanum* (68,7 cm), *Tilia tomentosa* (65,0 cm) und *Populus × euramericana 'Robusta'* (59,8 cm). Zu den Bäumen mit mittleren Stammdurchmesserwerten im Bereich von etwa 25 bis 35 cm gehören *Quercus robur*, *Acer pseudoplatanus*, *Juglans regia*, *Fraxinus excelsior*, *Acer campestre*, *Acer platanoides* und *Salix alba*. Diese haben meist moderate Variationskoeffizienten, was auf ähnliche Größenstrukturen innerhalb der jeweiligen Art hinweist. Zudem sind einige Baumarten mit kleinen bis sehr kleinen dbh-Werten zu nennen. Dazu gehören *Corylus colurna* mit 3,8 cm, *Crataegus 'Carrierei'* mit 8,1 cm und *Prunus × hillieri 'Spire'* mit 8,3 cm. Die Höhenverteilung (H) des Baumbestandes wird ebenfalls betrachtet. Die höchsten Bäume stammen aus den Arten, *Populus × euramericana 'Robusta'* mit 31,7 m, *Fagus sylvatica* mit 21,2 m und *Populus nigra 'Italica'* mit 20,1 m. Kleinere Arten sind zum Beispiel *Tilia americana 'Nova'*, *Crataegus 'Carrierei'* oder *Prunus × hillieri 'Spire'*, welche Höhen unter 8 m erreichen.

Der Sky-View-Faktor (SVF) ist über alle Arten hinweg relativ gering mit Werten zwischen 0,12 und 0,17, was auf eine ausgeprägte Überdeckung beziehungsweise Verschattung der Baumkronen hindeutet. Auch die innerartlichen Unterschiede sind deutlich geringer als bei Höhe und Stammdurchmesser der Bäume.

Betrachtet man die Zuordnung der Bäume zu den Trockenheitstoleranzklassen, so ist ersichtlich, dass die Mehrheit des Bestands eine mittlere Toleranz besitzt. Zudem sind einige Arten einer hohen Toleranz zugeordnet. Darunter sind *Robinia pseudoacacia*, *Platanus x acerifolia*, *Crataegus 'Carrierei'* oder *Corylus colurna* zu nennen. Arten mit niedriger Trockenheitstoleranz sind durch die Baumarten *Betula pendula* und *Prunus x hillieri 'Spire'* deutlich weniger vertreten. Die Kombination der strukturellen Kennwerte lässt vermuten, dass insbesondere große und hoch tolerante Arten wie *Robinia pseudoacacia* und *Platanus x acerifolia* eine zentrale Rolle bei der Bereitstellung städtischer Ökosystemdienstleistungen spielen, während kleine und toleranzschwache Arten stärker von Standortbedingungen abhängig sind, um potentielle Ökosystemdienstleistungen bereitzustellen.

Tab. 5 Am häufigsten vorkommende Baumarten auf öffentlichen Grund in Speyer (grün = Baumarten im CityTree Model; N = Baumanzahl; Toleranz = Toleranz gegenüber Trockenheit in n – niedrig, m – mittel und h – hoch nach Niinemets and Valladares 2006; dbh = Stammdurchmesser; H = Baumhöhe; SVF = Sky View Factor) Bei „Malus“ handelt es sich um eine Gattung. (Basierend auf den Daten des Baumkatasters der Stadt Speyer 2025)

	Baumart	N	Toleranz			dbh (cm)		H (m)		SVF	
			n	m	h	\bar{x}	VK	\bar{x}	VK	\bar{x}	VK
1	<i>Quercus robur</i>	596		X		29,6	0,61	12,9	0,56	0,15	0,20
2	<i>Acer pseudoplatanus</i>	470		X		32,8	0,46	14,9	0,43	0,13	0,23
3	<i>Juglans regia</i>	464		X		32,4	0,45	13,2	0,48	0,14	0,21
4	<i>Robinia pseudoacacia</i>	420			X	34,1	0,47	15,5	0,42	0,12	0,25
5	<i>Fraxinus excelsior</i>	418		X		34,7	0,50	17,3	0,57	0,13	0,23
6	<i>Acer campestre</i>	353		X		29,3	0,53	12,9	0,44	0,14	0,21
7	<i>Populus x euramericana 'Robusta'</i>	342		X		59,8	0,38	31,7	0,30	0,12	0,25
8	<i>Acer platanoides</i>	332		X		28,9	0,48	13,0	0,45	0,14	0,21
9	<i>Salix alba</i>	322		X		29,5	0,48	14,4	0,48	0,13	0,23
10	<i>Betula pendula</i>	272	X			27,5	0,42	14,0	0,38	0,13	0,15
11	<i>Carpinus betulus</i>	259		X		23,24	0,61	10,6	0,5	0,14	0,21
12	<i>Populus nigra 'Italica'</i>	211		X		48,4	0,57	20,1	0,38	0,12	0,17
13	<i>Platanus x acerifolia</i>	210			X	33,1	0,52	15,4	0,41	0,15	0,20
14	<i>Prunus avium</i>	178		X		25,8	0,66	12,8	0,57	0,14	0,14
15	<i>Tilia americana 'Nova'</i>	157		X		10,5	0,66	6,5	0,55	0,14	0,21
16	<i>Corylus colurna</i>	150			X	3,8	0,68	6,0	0,35	0,15	0,13
17	<i>Malus</i>	146		X		12,0	0,05	5,6	0,52	0,16	0,19
18	<i>Pyrus calleryana 'Chanticleer'</i>	136			X	10,3	0,48	6,6	0,35	0,13	0,15
19	<i>Tilia x intermedia 'Pallida'</i>	131		X		15,5	0,68	8,0	0,40	0,14	0,14
20	<i>Tilia cordata 'Greenspire'</i>	126		X		17,7	0,53	9,6	0,36	0,13	0,15
21	<i>Tilia cordata</i>	125		X		32,2	0,42	13,8	0,38	0,13	0,23
22	<i>Quercus robur 'Fastigiata'</i>	115		X		22,7	0,62	13,5	0,47	0,12	0,25
23	<i>Acer campestre 'Élsrijk'</i>	108		X		8,9	0,46	6,4	0,31	0,17	0,12

24	<i>Tilia tomentosa</i>	107		X		65,0	0,67	12,2	0,45	0,13	0,23
25	<i>Ulmus 'New Horizon'</i>	102		X		26,6	0,91	8,2	0,38	0,15	0,20
26	<i>Aesculus hippocastanum</i>	99		X		68,7	0,74	12,8	0,46	0,13	0,23
27	<i>Alnus glutinosa</i>	92		X		27,7	0,57	12,4	0,5	0,13	0,23
28	<i>Crataegus 'Carrierei'</i>	83			X	8,1	0,47	5,2	0,44	0,15	0,20
29	<i>Fagus sylvatica</i>	80		X		37,7	0,40	21,2	0,38	0,13	0,23
30	<i>Prunus x hillieri 'Spire'</i>	79	X			8,3	0,68	5,9	0,49	0,13	0,15

Im Baumbestand der Stadt Speyer sind 3.612 t Biomasse gespeichert, 32,5 t Kohlenstoff werden jährlich sequestriert. Das entspricht 119,3 t durch die Photosynthese umgewandeltes CO₂. Um die räumliche Verteilung der Biomasse zu visualisieren wird eine Heatmap verwendet (s. Abb. 3). Die Darstellung zeigt deutlich, in welchen Bereichen der Stadt größere und geringere Mengen an Biomasse auftreten. Als Hotspot für Biomassevorkommen ist insbesondere der Friedhof im Nordwesten von Speyer, sowie die Grünfläche beim Bikepark an der Spaldingerstraße zu nennen. Im Bereich der Altstadt bilden der Domgarten und der nahegelegene Bereich des Speyerbaches Biomassehotspots. Es sind zudem weitere linienartige Hotspots zu erkennen. Diese sind größtenteils entlang der Wasserläufe, insbesondere an den dort direkt angrenzenden Grünflächen vorzufinden, welche sich wie "grüne Adern" durch Speyer ziehen. Beispiele hierfür sind der Bereich beim Mausbergweg, sowie der Bereich zwischen der B9, der Friedrich-Ebert-Straße und dem Woogbach. Weitere "grüne Adern" entstehen durch Straßenbegleitgrün.

24

Die Analyse der Biomasseverteilung ermöglicht eine erste Einschätzung darüber, welche Bereiche besonders stark zur Kohlenstoffspeicherung beitragen und wo potentiell Defizite im städtischen Grünbestand bestehen.

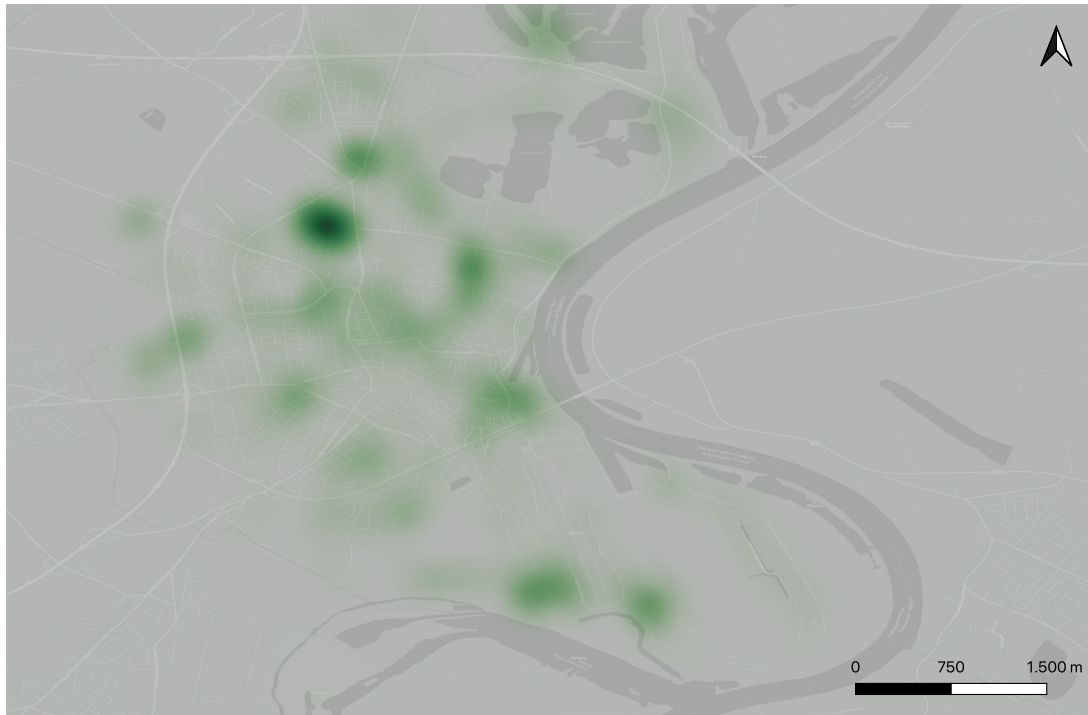


Abb. 3 Räumliche Biomasseverteilung (Bti in kg C/Baum/Jahr) der Individuen des Baumkatasters in Speyer. Darstellung als Heatmap in grün (dunkel beschreibt Orte mit höherem, hell beschreibt Orte mit niedrigerem Biomassevorkommen).

Da die Stadt Speyer aktuell bereits stark von Hitzestress betroffen ist und im Zuge des Klimawandels mit einer weiteren Zunahme von Trockenperioden zu rechnen ist, wurde die Trockenheitstoleranz der vorkommenden Baumarten eingehend betrachtet. Die Auswertung des Baumkatasters zeigt, dass 77 % der Bäume eine mittlere, 18 % eine hohe und lediglich 5 % eine geringe Trockenheitstoleranz aufweisen. Die Zuordnung der Baumarten basiert auf den Angaben aus Niinemets und Valladares (2006).

Auf Abb.4 ist die räumliche Verteilung dieser Kategorien zu sehen. Stadtbäume mit einer mittleren Trockenheitstoleranz befinden sich überwiegend entlang der Wasserläufe, als Straßenbegleitgrün, auf Plätzen und in Grünanlagen. Unter den straßenbegleitenden Baumpflanzungen sind beispielsweise die Paul-Egell-Straße, der südliche Bereich des Rheins, entlang des Hammelweidegrabens, im Wohngebiet entlang der Straße Im Vogelsang, sowie der Joachim-Becher Straße zu nennen. Grünflächen mit einem hohen Anteil an Bäumen, welche einer mittleren Trockenheitstoleranz zugeordnet wurden, sind unter anderem der Domgarten und der Alte Friedhof. Eine hohe Trockenheitstoleranz ist durch die Bäume entlang der Landwehrstraße im Einzugsbereich des Alten Friedhofes vertreten. Im Wohngebiet südlich der B39 ist die Kardinal-Wendel-Straße, sowie die Windthorstenstraße mit trockenheitstoleranten Baumarten bepflanzt worden. Positiv hervorzuheben ist zudem die straßenbegleitende Bepflanzung entlang der Burgstraße, sowie der Iggelheimerstraße mit trockenheitstoleranten Baumarten. Bäume mit einer geringen Trockenheitstoleranz bilden die kleinste Gruppe und kommen nur spärlich in der Stadt

Speyer vor. Größtenteils stehen diese entlang und nahe von Grün- und Wasserflächen. Ein Beispiel hierfür ist der Alte Friedhof, sowie die Bereiche entlang des Speyerlachsees, des Sonnensees, sowie dem dazugehörigen Parkplatz. Zudem ist die straßenbegleitende Baumbepflanzung entlang der Christoph-Lehmann-Straße zu nennen.



Abb. 4 Räumliche Verteilung der Bäume in Speyer nach Trockenheitstoleranz (Einteilung der Kategorien basierend auf Werten von Niinemets and Valladares 2006) hoch = ≥ 3 (grün); mittel = <3 (gelb), gering <2 (rot).

Betrachtet man die Durchmesserverteilungen innerhalb der drei Trockenheitstoleranzgruppen, zeigt sich ein ähnliches Muster (s. Abb. 5). In allen Gruppen dominieren die niedrigeren Stammdurchmesserklassen, insbesondere die Klassen von 10 bis 40, während große Durchmesserklassen zunehmend weniger vertreten sind. Besonders ausgeprägt ist dies bei Arten mit einer hohen Trockenheitstoleranz, bei welchen über 40 % der Gruppe zu den niedrigsten Durchmesserklassen gehören. Bei mittel und gering toleranten Arten fällt dieser Peak weniger stark aus. Die Verteilung fällt in diesen Toleranzen über die kleineren Durchmesserklassen gleichmäßiger aus, mit Anteilen zwischen rund 11 und 23 %. In den höheren Durchmesserklassen zwischen 70 und 100 kommt nur ein geringer Anteil der Stadtbäume vor. Trotz erkennbarer Unterschiede weisen die drei Gruppen insgesamt ähnliche Verteilungsmuster auf. Der Schwerpunkt liegt jeweils auf den niedrigen Stammdurchmesserklassen, während höhere Durchmesser nur selten vorkommen. Diese strukturelle Ähnlichkeit der Verteilungen ermöglicht es, die Einteilung nach Trockenheitstoleranz für tiefergehende Analysen bezüglich der Ökosystemdienstleistungen zu nutzen, ohne dass starke Verzerrungen durch abweichende Durchmesserverteilungen zu erwarten sind.

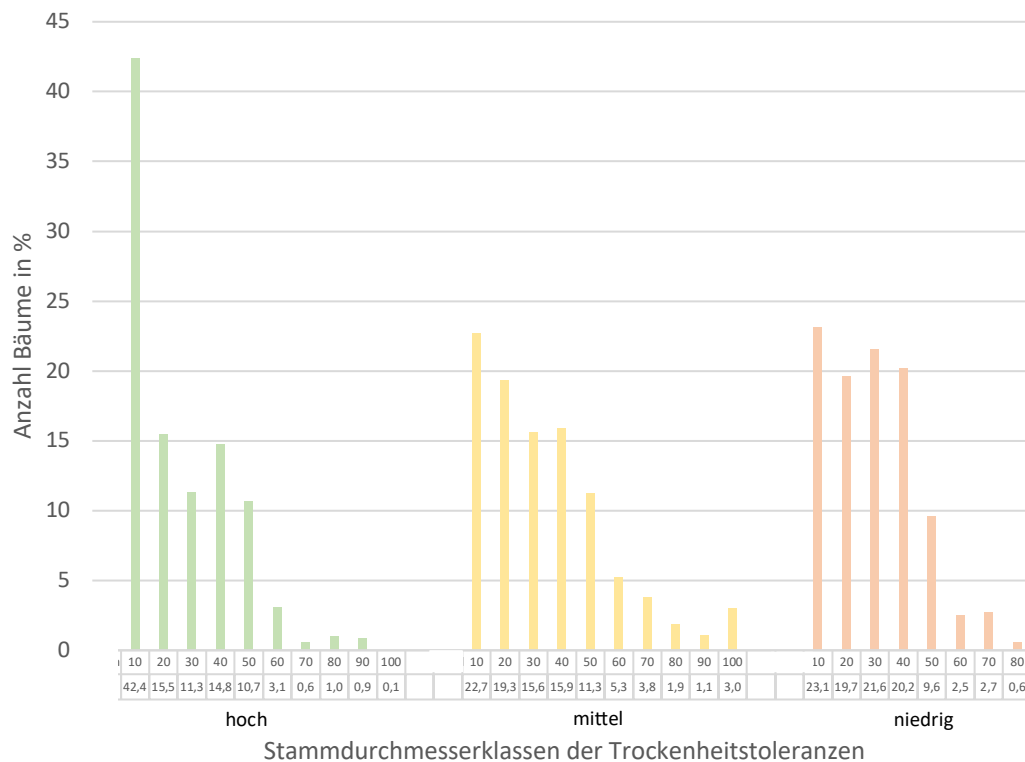


Abb. 5 Relative Anzahl der Bäume nach Trockenheitstoleranz und Stammdurchmesserklassen (10 bis 100) (Einteilung der Trockenheitstoleranz basierend auf Werten von Niinemets and Valladares 2006; hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2).

Daraufhin wird die Stammdurchmesserverteilung der Bäume in Speyer genauer betrachtet (s. Abb. 6). Der größte Anteil Bäume befindet sich in der Durchmesserklasse 10. Der Anteil sinkt mit zunehmender Baumdurchmesserklasse, mit Ausnahme eines kleinen Zwischenhochs in Klasse 40 mit 25 %, sowie der leicht erhöhten Werte in Klasse 100 mit 3,7 %. Die Stammdurchmesserverteilung lässt sich durch ein exponentielles Regressionsmodell erklären. Das bestätigt das hohe Bestimmtheitsmaß mit 0,91.

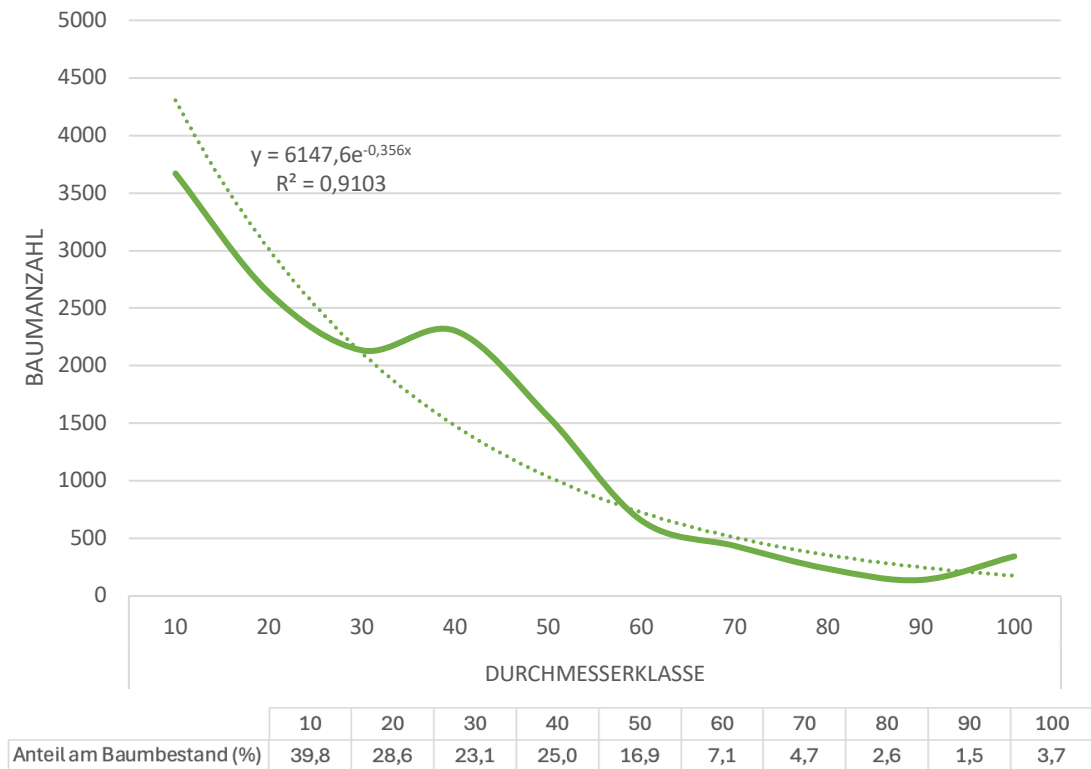


Abb. 6 Stammdurchmesserverteilung der Stadtbäume des Baumkatasters in Speyer, eingeteilt in 10 Klassen, in absoluten und relativen Werten. Die Durchmesserverteilung lässt sich durch eine exponentielle Regression (y) erklären und wird als gepunktete Linie dargestellt.

Bei der räumlichen Verteilung der Stammdurchmesser sind einige Hotspots zu erkennen (s. Abb. 7). Auffällig ist, dass die Bäume mit einem hohen Durchmesser größtenteils auf Grünflächen und entlang, beziehungsweise in der Nähe von Wasserläufen zu finden sind. Dazu zählen der Woogbach und der Speyerbach. Entlang des Woogbaches stehen Bäume insbesondere beim Mausbergweg, Boligweg und der Burgstraße. In der Holzstraße entlang des Speyerbaches wachsen ebenfalls Bäume mit einem hohen Durchmesser. Auffällig ist zudem, dass in der Nähe der Altstadt (Bereich rund um die Maximiliansstraße und dem Domplatz) wenige Bäume wachsen. Diese haben einen geringen Stammdurchmesser der zwei kleinsten Klassen (1,2 - 16,9 cm). In den Grünflächen rund um die Altstadt sind jedoch einige Bäume der höheren Durchmesserklassen vorzufinden, beispielsweise im Domgarten und im Adenauerpark. Bäume der niedrigsten Durchmesserklasse (1,2 bis 7,9 cm) kommen insbesondere als Straßenbegleitgrün vor. Beispiele hierfür sind die Petschengasse, welche in die Fritz-Oberstraße mündet, die Armbruststraße, die Iggelheimerstraße, Christoph-Lehmann-Straße, die Tullastraße und der Martinskirchweg.

In den Stadtrandgebieten sind Bäume mit einem großen Stammdurchmesser ebenfalls in der Nähe von Wasseransammlungen zu finden. Einerseits ist hier der südliche Bereich des Rheins, entlang des Hammelweidegrabens zu nennen. Andererseits sind einige dieser Bäume in der Nähe zu Seen vorzufinden, darunter der Franzosengraben

in unmittelbarer Nähe des Wammsees, sowie auf dem Parkplatz und direkt angrenzend an die Seen Speyerlachsee, Sonnensee, Binsfeld und Kuhunter.

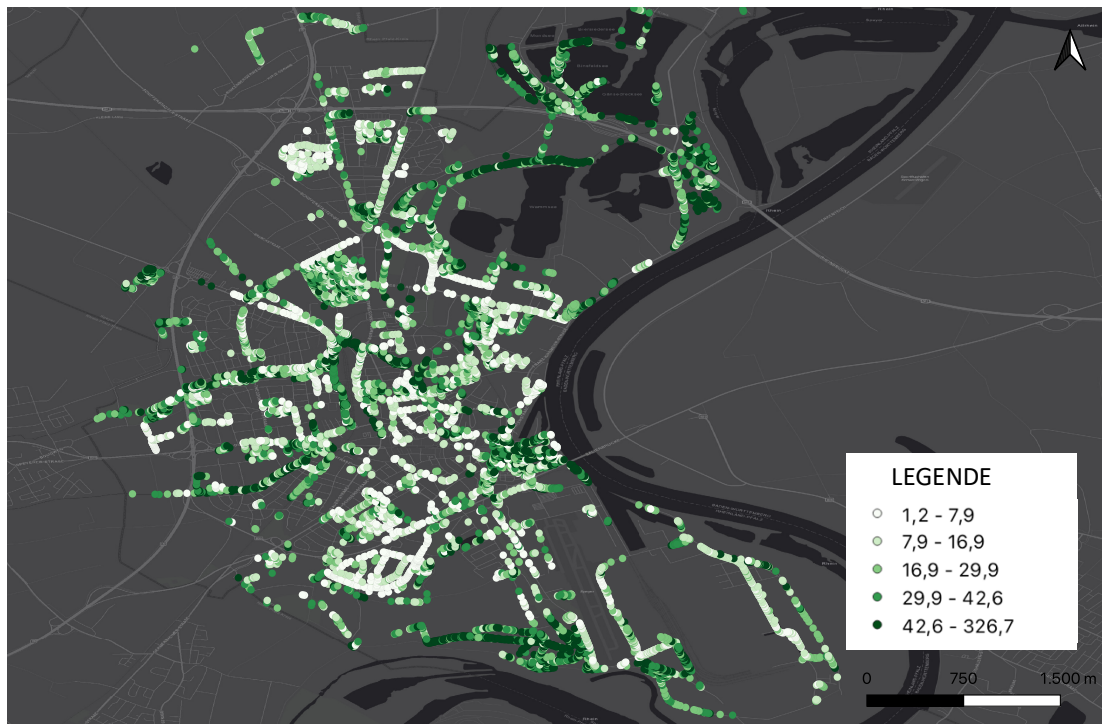


Abb. 7 Räumliche Verteilung der Stammdurchmesser in Speyer (cm), Klasseneinteilung nach Quantilen.

Zusätzlich zum Stammdurchmesser wird die Höhe der Bäume näher betrachtet. Mit 2.839 Bäumen ist die Höhenklasse 10, gefolgt von Klasse 15 mit 2.203 Bäumen in Speyer am meisten vertreten. Die Baumart *Populus x euramericana* 'Robusta' unterscheidet sich in der Höhenverteilung deutlich zu den anderen Baumarten. Sie weist die höchste Anzahl an Individuen in der Klasse 40 auf (s. Anhang 3).

Desweiteren wird die Versiegelung als ausschlaggebender und vergleichbarer Standortfaktor betrachtet, welche das Wachstum und die Ökosystemdienstleistungen der Bäume maßgeblich beeinflusst. Eine Analyse der Versiegelung am Baumstandort liefert somit wichtige Informationen zur Standortqualität und zur Anpassungsfähigkeit des städtischen Baumbestandes an den Hitzestress. Auf der Karte (s. Abb. 8) ist zu erkennen, dass einige unversiegelte Baumstandorte in Speyer vorhanden sind. Diese befinden sich in Grünflächen wie dem Domgarten, die nördlichen Wasserflächen, wie den Steinhäuserwühlsee, Wammsee und den Kuhuntersee, sowie entlang des Woogbaches, des Speyerbaches und des Rheines. Bäume mit einer hohen Versiegelung sind zudem größtenteils in Einfamilienhausgebieten und allgemein als Straßenbegleitgrün, sowie als Bepflanzungen auf Plätzen wie dem Domplatz vorzufinden. Auffällig ist der Bereich des Friedhofs, in dem ein hoher Anteil der Bäume den Versiegelungsklassen zwischen 22,7 % und 95 % zugeordnet ist. Aufgrund seiner parkähnlichen Struktur wäre grundsätzlich ein niedriger Versiegelungsgrad unter den Bäumen zu erwarten.

Der erhöhte Wert lässt sich jedoch vermutlich dadurch erklären, dass zahlreiche Bäume direkt angrenzend an bzw. in unmittelbarer Nähe von Wegen wachsen.



Abb. 8 Versiegelung unter den Stadtbäumen von Speyer (in %). Klasseneinteilung nach Quantilen.

3.2 Wachstum und Ökosystemdienstleistungen

Wachstum und Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen Bedingungen

Für 9.232 Bäume der Stadt Speyer werden die Simulationen mit dem CityTree Model ausgeführt. Zunächst wird die Simulation des langjährigen Mittels (1991-2020) durchgeführt, welche die Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen Klimabedingungen darstellt. Die Evapotranspirationskühlung in den Sommermonaten (Juni, Juli und August) in Kilowattstunden, sowie der Biomassezuwachs in Kilogramm Trockengewicht pro Baum und Jahr (kg Tg/Baum/a) werden dabei genauer betrachtet. Etwa die Hälfte des Biomassezuwachses ist gebundener Kohlenstoff.

Zu Beginn werden die Gesamtwerte der Ökosystemdienstleistungen aller Bäume in Speyer betrachtet (s. Tab. 6). Summiert stellen die Stadtbäume in Speyer 71,4 GWh Kühlungsenergie in den Sommermonaten zur Verfügung. Hinsichtlich der drei Trockenheitstoleranzen sind deutliche Unterschiede zu erkennen (s. Tab. 6). Die Bäume mit einer mittleren Toleranz erreichen dabei die höchsten durchschnittlichen und maximalen Kühlleistungen mit 8.140 kWh und 32.404 kWh. Die zweitgrößten Leistungen erbringen Bäume der niedrigen Toleranzklasse mit einem 17 % geringeren Durch-

schnittswert. Die besonders trockenheitstoleranten Arten produzieren jedoch im Mittel 30 % geringere Kühlleistungen im Vergleich zu Bäumen mit einer mittleren Trockenheitstoleranz. Die Standardabweichung ist in allen Gruppen relativ hoch (7.265–8.666 kWh), was eine große Spannweite unterschiedlicher Leistungen innerhalb der Toleranzklassen beschreibt. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 1,04 und 1,19 und zeigt damit eine ähnlich hohe relative Variabilität in allen drei Gruppen, wobei Bäume mit einer hohen Trockenheitstoleranz die stärksten relativen Schwankungen zeigen.

Die aktuelle Beschattungskühlung der Stadtbäume in Speyer wird ebenfalls in Tab. 6 gezeigt. Insgesamt erreichen die Kühlungswerte durch Beschattung deutlich höhere Gesamtwerte im Vergleich zur Evapotranspirationskühlung. Die höchsten durchschnittlichen Werte der Beschattungskühlung werden für die Bäume mit einer mittleren Trockenheitstoleranz mit 8.904 kWh erreicht. Bäume mit einer hohen Trockenheitstoleranz leisten die zweithöchste durchschnittliche Kühlung mit 7.539 kWh. Die Spannweite der Leistungen für die Beschattungskühlung sind ebenfalls hoch und liegen bei einem Variationskoeffizient zwischen 1,07 bei einer niedrigen, 1,09 bei einer mittleren und bei 1,18 bei einer hohen Trockenheitstoleranz.

Beim Biomassezuwachs zeigen sich noch deutlichere Unterschiede zwischen den Toleranzklassen. Besonders trockenheitstolerante Arten weisen sowohl die höchsten maximalen Werte (34,43 kg Tg/Baum/a) als auch die höchsten durchschnittlichen Biomassezuwächse (8,42 kg Tg/Baum/a) auf, gefolgt von Arten einer mittleren Trockenheitstoleranz mit maximal 27,29 kg Tg/Baum/a und durchschnittlich 7,02 kg Tg/Baum/a. Die mittlere Toleranzklasse erreicht durchschnittliche Werte, welche um 17 % geringer sind im Vergleich zu hoch toleranten Bäumen. Bäume mit einer niedrigen Toleranz zeigen hingegen mit Abstand die geringsten Werte mit maximal 11,92 kg Tg/Baum/a und durchschnittlich 1,23 kg Tg/Baum/a. Die mittlere Wachstumsleistung dieser Bäume ist somit um 85 % geringer im Vergleich zu den Bäumen mit einer hohen Trockenheitstoleranz. Trotz dieser Unterschiede weisen alle drei Gruppen hohe Variationskoeffizienten auf (1,28–1,39), was bedeutet, dass die Variabilität der Daten in allen Gruppen hoch ist.

Tab. 6 Ökosystemdienstleistungen der Bäume des Katasters in Speyer unter dem langjährigen Mittel, unterteilt nach Trockenheitstoleranz (Zuordnung basierend auf Niinemets and Valladares 2006: hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2) Dargestellte Dienstleistungen: Evapotranspirationskühlung (kWh im Sommer), Beschattungskühlung (kWh im Sommer) und Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a).

Ökosystemdienstleistungen im langjährigen Mittel	Trockenheitstoleranz		
	niedrig	mittel	hoch
Evapotranspirationskühlung (kWh)			
Summe (Σ)	3.613.569	57.574.635	10.191.378
Maximum	27.131	32.404	27.806
Minimum	65	64	89
Mittelwert (\bar{x})	6.962	8.140	6.214
Standardabweichung (S)	7.265	8.666	7.420
Variationskoeffizient (VK)	1,04	1,06	1,19
Beschattungskühlung (kWh)			
Summe (Σ)	3.286.761	62.984.808	12.356.317
Maximum	37.383	115.008	60.134
Minimum	81	76	106
Mittelwert (\bar{x})	6.333	8.904	7.539
Standardabweichung (S)	6.794	9.758	8.875
Variationskoeffizient (VK)	1,07	1,09	1,18
Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a)			
Summe (Σ)	1.615	49.630	13.805
Maximum	11,92	27,29	34,43
Minimum	0	0	0,01
Mittelwert (\bar{x})	3,11	7,02	8,42
Standardabweichung (S)	4,3	8,96	11,68
Variationskoeffizient (VK)	1,38	1,28	1,39

Daraufhin wird thematisiert, ob es signifikante Leistungsunterschiede zwischen den Baumarten gibt. In Tab. 7 werden die Ökosystemdienstleistungen Evapotranspirationskühlung und Biomassezuwachs für alle Bäume der Stadt Speyer dargestellt, welche laut Kataster einer der Baumarten aus dem CityTree Model zugeordnet wurden. Die Dienstleistungen werden für das langjährige Mittel beschrieben, in Form von Summe (Σ), maximalen und minimalen Wert, Mittelwert (\bar{x}), Standardabweichung (S) und Variationskoeffizient (VK). Der Vergleich der Ökosystemdienstleistungen zwischen den Baumarten des CityTree Models zeigt deutliche artspezifische Unterschiede in der Evapotranspirationskühlung als auch im Biomassezuwachs. Die mittlere Kühlleistung (\bar{x}) variiert deutlich zwischen den Arten und reicht von 7.480 kWh bei *Carpinus betulus* bis zu 13.368 kWh bei *Platanus \times acerifolia*, die damit die höchste durchschnittliche Kühlleistung aller Baumarten aufweist. Auch *Tilia cordata* (10.397 kWh) und *Fraxinus excelsior* (10.704 kWh) erreichen überdurchschnittlich hohe mittlere Kühlwerte. Gleichzeitig sind bei den meisten Arten hohe Standardabweichungen zu beobachten (5.912 – 9.068 kWh), was auf eine breite Streuung der individuellen Leistungen der Bäume innerhalb ihrer Gruppe hinweist. Eine besonders hohe relative Variabilität (Variationskoeffizient $> 0,9$) ist bei den Arten *Carpinus betu-*

lus (0,99), *Quercus robur* (0,96) und *Populus nigra 'Italica'* (0,94) zu beobachten. Vergleichsweise stabilere, aber dennoch stark variable Kühlleistungen werden von den Baumarten *Robinia pseudoacacia* (0,61) und *Fagus sylvatica* (0,61) erreicht.

Beim Biomassezuwachs sind ebenfalls deutliche Unterschiede zwischen den Arten zu erkennen. Der höchste mittlere Zuwachs ist bei den Baumarten *Robinia pseudoacacia* mit 16,5 kg Tg/Baum/a und *Tilia cordata* mit 15,3 kg Tg/Baum/a zu beobachten. Diese Arten tragen somit insbesondere zur Kohlenstoffbindung bei. Arten wie *Betula pendula* (3,6 kg Tg/Baum/a) und *Aesculus hippocastanum* (4,8 kg Tg/Baum/a) weisen hingegen die geringsten durchschnittlichen Werte auf. Die Standardabweichungen sind beim Biomassezuwachs ebenfalls hoch (4,2–13,6 kg). Betrachtet man den Variationskoeffizienten wird deutlich, dass dieser bei nahezu allen Arten höher als bei der Kühlleistung liegt. Größtenteils werden Werte über 0,8 erreicht, in einigen Fällen sogar über 1,0. *Quercus robur* beispielsweise verzeichnet einen variablen Biomassezuwachs von 1,25. Die Arten *Tilia cordata* und *Platanus x acerifolia* erreichen hingegen die geringsten Variationskoeffizienten von 0,72 und 0,73. Im Vergleich zur Evapotranspirationskühlung ist der Biomassezuwachs im langjährigen Mittel die Ökosystemdienstleistung mit stärker variierenden Werten innerhalb derselben Baumart.

Tab. 7 Ökosystemdienstleistungen der Bäume des Katasters im langjährigen Mittel (Evapotranspirationskühlung in kWh im Sommer und Biomassezuwachs in kg Tg/Baum/a) Es werden die zwölf Baumarten des CityTree Models differenziert. (\bar{x} = Mittelwert; S = Standardabweichung; VK = Variationskoeffizient)

Baumart	Evapotranspirationskühlung (kWh)			Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a)		
	\bar{x}	S	VK	\bar{x}	S	VK
<i>Acer platanoides</i>	9.077	6.549	0,72	10,3	8,5	0,82
<i>Acer pseudoplatanus</i>	9.933	7.428	0,75	10,7	9,5	0,89
<i>Aesculus hippocastanum</i>	7.860	7.072	0,90	4,8	5,5	1,12
<i>Betula pendula</i>	8.039	6.924	0,86	3,6	4,2	1,17
<i>Carpinus betulus</i>	7.480	7.425	0,99	7,5	8,1	1,07
<i>Fagus sylvatica</i>	9.736	5.947	0,61	8,3	7,2	0,87
<i>Fraxinus excelsior</i>	10.704	7.831	0,73	10,6	10,5	0,99
<i>Platanus x acerifolia</i>	13.368	8.702	0,65	11,1	8,1	0,73
<i>Populus nigra 'Italica'</i>	9.306	8.796	0,94	11,5	13,6	1,18
<i>Quercus robur</i>	9.438	9.068	0,96	6,7	8,4	1,25
<i>Robinia pseudoacacia</i>	9.708	5.912	0,61	16,5	13,0	0,78
<i>Tilia cordata</i>	10.397	6.799	0,65	15,3	11,0	0,72

Stadtweite Gesamtleistung unter Klimaszenarien

Für 9.232 Bäume der Stadt Speyer werden weitere Simulationen mit dem CityTree Model durchgeführt, um die Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume unter zukünftigen Klimabedingungen und unter Extrembedingungen zu ermitteln. Dabei handelt es sich um ein Trockenjahr, sowie weitere zukünftige Klimate, dem moderaten RCP 2.6-Szenario und dem pessimistischen RCP 8.5-Szenario.

Hinsichtlich der Evapotranspirationskühlung wird im aktuellen Zustand stadtweit eine Kühlungsenergie von 71,4 GWh erreicht. Über die zukünftigen Klimaszenarien und dem Trockenjahr hinweg, ist durchweg ein Rückgang im Vergleich zum langjährigen Mittel zu beobachten (s. Abb. 9). Im Trockenjahr sinken die Werte am stärksten um 55 % auf 45,9 GWh ab. Im moderaten Klimaszenario RCP 2.6 ist ein Rückgang von 21 % zu verzeichnen, während im pessimistischen Szenario RCP 8.5 ein Rückgang von 17 % im Vergleich zum langjährigen Mittel zu sehen ist. Hervorzuheben ist dabei, dass die Evapotranspirationskühlung, wenn sie mit Werten des moderaten Klimaszenarios verglichen werden, um 3 % leicht ansteigen.

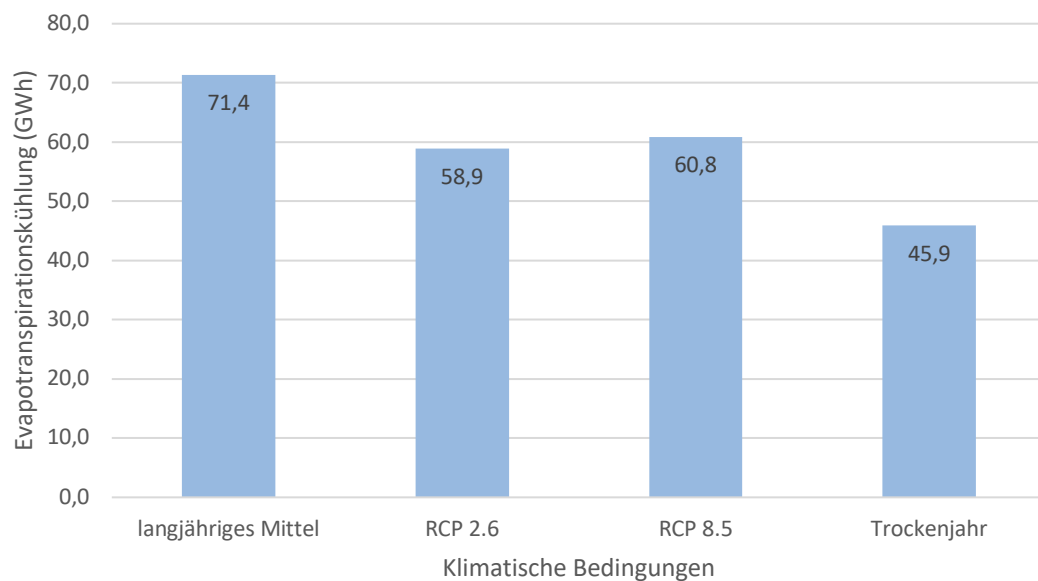


Abb. 9 Sommerliche Evapotranspirationskühlung (GWh) der Stadtbäume des Katasters in Speyer unter vier verschiedenen klimatischen Bedingungen.

Die Kühlung durch Beschattung wird nachfolgend kurz beschrieben. Die Beschattungskühlung erfährt im Vergleich zum langjährigen Mittel in allen Szenarien eine Zunahme, was auf die höhere Strahlungsintensität sowie auf die Modellberechnung im CityTree Model nach dem Lambert-Beerschen Gesetz zurückzuführen ist. Aufgrund der gesteigerten einfallenden Strahlung, wirkt der relative Kühlungseffekt durch Verschattung stärker. Der größte Zuwachs ist im Trockenjahrszenario zu verzeichnen, mit insgesamt 65,5 %, gefolgt vom RCP-8.5-Szenario mit 60,2 % und RCP-2.6-Szenario mit 56,4 %.

Die Entwicklung des Biomassezuwachses ist auf Abb. 10 zu erkennen. Dieser sinkt unter allen Klimaszenarien und dem Trockenjahr, im Vergleich zum langjährigen Mittel signifikant. Am stärksten ist der Rückgang mit 40 % im Trockenjahr. Unter dem Klimaszenario RCP 2.6 reduziert sich der Biomassezuwachs um 17 % und unter dem RCP 8.5-Szenario um 6,5 %. Auch bei dieser Ökosystemleistung ist der Rückgang somit im pessimistischen Klimaszenario geringer als im moderaten Klimaszenario (um 12,8 %).

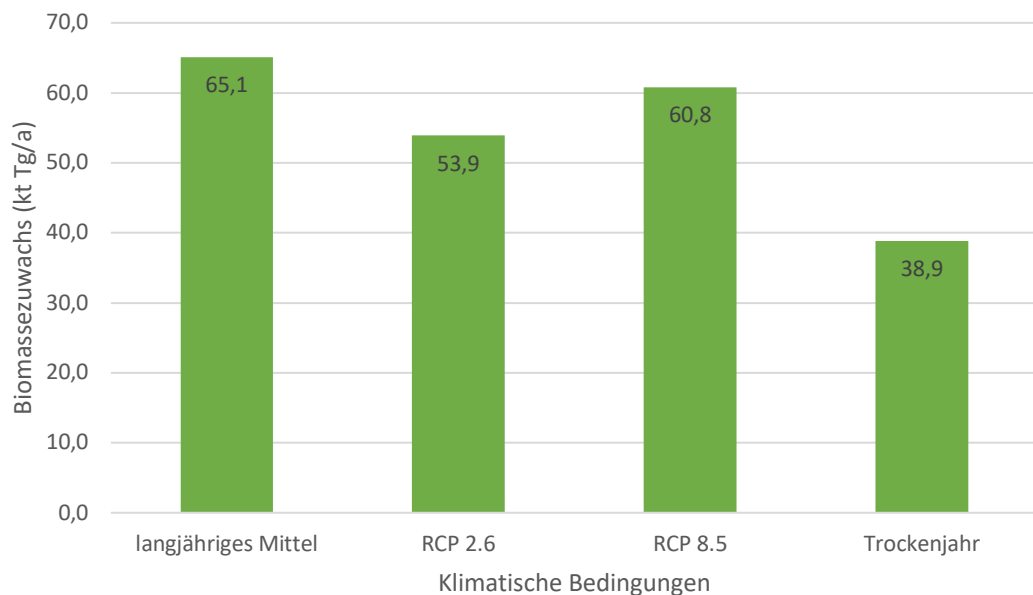


Abb. 10 Jährlicher Biomassezuwachs (kt Tg/Baum/a) der Stadtbäume des Katasters in Speyer unter vier verschiedenen klimatischen Bedingungen.

Ökosystemdienstleistungen und Trockenheitstoleranz

Es werden die Unterschiede in den Ökosystemdienstleistungen zwischen trockenheitstoleranten und trockenheitsempfindlichen Baumarten unter verschiedenen Klimaszenarien betrachtet. Dafür werden die Leistungen im moderaten und pessimistischen Klimaszenario, sowie im Trockenjahres und im langjährigen Mittel für Bäume einer niedrigen, mittleren und hohen Trockenheitstoleranz analysiert.

In Tab. 8 ist zu sehen, wie sich die Evapotranspirationskühlung und der Biomassezuwachs der Bäume in Speyer mit einer niedrigen, einer mittleren und einer hohen Trockenheitstoleranz unter verschiedenen Klimaszenarien entwickeln.

Betrachtet man die Werte der Evapotranspiration, so nehmen diese in allen Klimaszenarien (Trockenjahr, RCP 2.6, RCP 8.5) im Vergleich zum langjährigen Mittel ab. Die höchsten Rückgänge sind bei den Bäumen mit einer niedrigen Trockenheitstoleranz zu verzeichnen. Bei den Bäumen mit einer mittleren Toleranz gegenüber Trockenheit sind moderate Verluste zu verzeichnen. Die geringsten Rückgänge sind bei den Bäumen mit einer hohen Trockenheitstoleranz zu erkennen.

Tab. 8 Evapotranspirationskühlung (kWh im Sommer) unter vier klimatischen Bedingungen nach Trockenheitstoleranz der Bäume (Zuordnung basierend auf Niinemets and Valladares 2006: hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2)

Evapotranspirationskühlung (kWh) unter klimatischen Bedingungen	Trockenheitstoleranz		
	niedrig	mittel	hoch
Langjähriges Mittel			
Maximum	27.131	32.404	27.806
Minimum	65	64	89
Mittelwert (\bar{x})	6.962	8.140	6.214
Standardabweichung (S)	7.265	8.666	7.420
Variationskoeffizient (VK)	1,04	1,06	1,19
Trockenjahr			
Maximum	14.662	20.858	20.214
Minimum	52	64	68
Mittelwert (\bar{x})	3.800	5.182	4.432
Standardabweichung (S)	3.809	5.446	5.230
Variationskoeffizient (VK)	1,0	1,05	1,18
RCP 2.6			
Maximum	20.723	26.833	24.833
Minimum	58	58	71
Mittelwert (\bar{x})	5.258	6.673	5.468
Standardabweichung (S)	5.352	7.122	6.584
Variationskoeffizient (VK)	1,01	1,06	1,2
RCP 8.5			
Maximum	21.941	28.048	24.958
Minimum	59	60	65
Mittelwert (\bar{x})	5.748	6.899	5.524
Standardabweichung (S)	5.920	7.361	6.670
Variationskoeffizient (VK)	1,03	1,06	1,2

Der Biomassezuwachs von Baumarten unterschiedlicher Trockenheitstoleranz zeigt deutlichere Unterschiede in den Ausgangswerten des langjährigen Mittels als die der Evapotranspirationskühlung (siehe Tab. 9). Bäume mit niedriger Trockenheitstoleranz weisen die geringsten Mittelwerte in allen Szenarien auf. Die maximalen Biomassezuwächse für diese Bäume liegen bei etwa 12 kg Trockengewicht pro Baum und Jahr im langjährigen Mittel, 6,5 kg im Trockenjahr, 8 kg unter RCP 2.6 und 10 kg unter RCP 8.5. Somit reagieren diese Arten negativ auf klimatische Veränderungen und haben allgemein einen niedrigeren Biomassezuwachs zu verzeichnen als die Bäume einer mittleren und hohen Toleranz. Über alle Szenarien hinweg treten die höchsten Mittel- und Maximalwerte bei den Arten mit einer hohen Trockenheitstoleranz auf. Die Mittel- und Maximalwerte der Bäume einer mittleren Trockenheitstoleranz sind etwas niedriger als die der hoch toleranten Bäume.

Tab. 9 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) unter vier klimatischen Bedingungen nach Trockenheitstoleranz der Bäume (Zuordnung basierend auf Niinemets and Valladares 2006: hoch ≥ 3 , mittel < 3 , gering < 2)

Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) unter klimatischen Bedingungen	Trockenheitstoleranz		
	niedrig	mittel	hoch
Langjähriges Mittel			
Maximum	11,92	27,29	34,43
Minimum	0	0	0,01
Mittelwert (\bar{x})	1,23	7,02	8,42
Standardabweichung (S)	4,3	8,96	11,68
Variationskoeffizient (VK)	1,38	1,28	1,39
Trockenjahr			
Maximum	6,53	15,58	19,89
Minimum	0	0	0,01
Mittelwert (\bar{x})	1,68	4,16	5,22
Standardabweichung (S)	2,38	5,39	7,33
Variationskoeffizient (VK)	1,42	1,29	1,40
RCP 2.6			
Maximum	8,08	22,07	21,91
Minimum	0	0	0
Mittelwert (\bar{x})	2,18	5,69	5,52
Standardabweichung (S)	3,08	7,26	7,26
Variationskoeffizient (VK)	1,41	1,27	1,31
RCP 8.5			
Maximum	10,3	10,3	32,7
Minimum	0	0	0
Mittelwert (\bar{x})	2,7	2,7	8,1
Standardabweichung (S)	3,71	3,71	11,40
Variationskoeffizient (VK)	1,37	1,37	1,40

Auffällig ist, dass bei Bäumen mit niedriger und hoher Trockenheitstoleranz die geringsten Werte im Trockenjahr erreicht werden, während bei Bäumen mit mittlerer Toleranz die niedrigsten Biomassezuwächse im extremen Klimaszenario RCP 8.5 auftreten. Das kann an der hohen und diversen Datenmenge liegen, da ein Großteil der Stadtbäume in Speyer einer mittleren Trockenheitstoleranz zuzuordnen sind, diese aber zu unterschiedlichen Umweltbedingungen wachsen. Um die Streuung des Biomassezuwachses besser einschätzen zu können, wurde zusätzlich ein Boxplotdiagramm der Bäume mit einer mittleren Trockenheitstoleranz (s. Abb. 11) sowie einer niedrigen und hohen Trockenheitstoleranz (s. Anhang 5) erstellt. Die Streuung der Daten für die Bäume einer mittleren Toleranz ist im langjährigen Mittel am höchsten, dicht gefolgt vom RCP 2.6-Szenario.

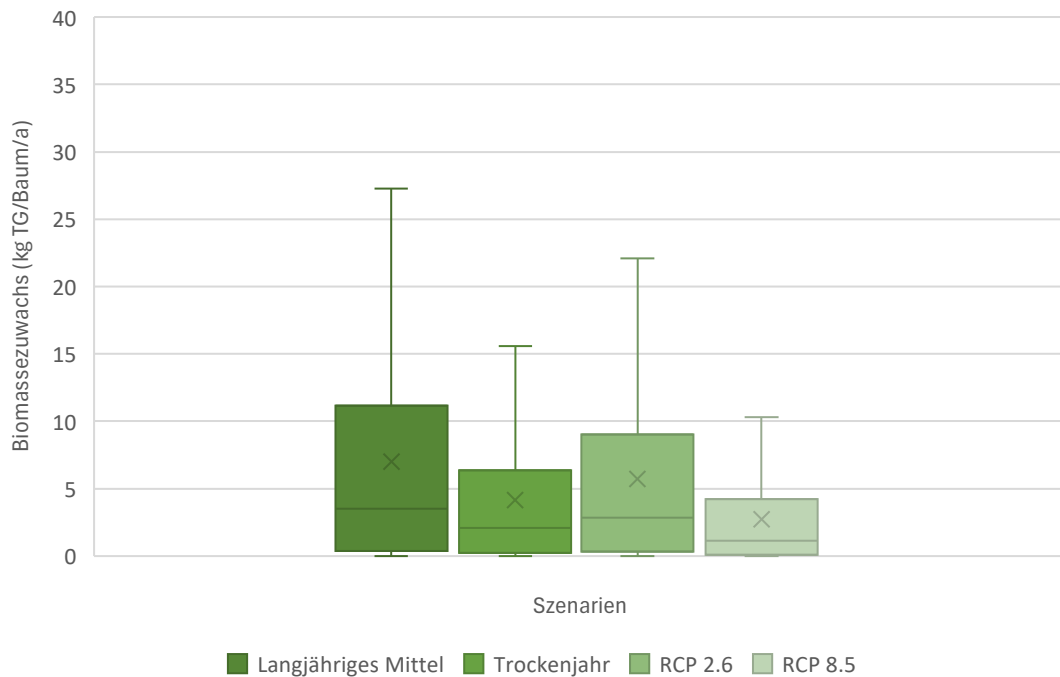


Abb. 11 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) der Bäume einer mittleren Trockenheitstoleranz unter vier Klimaszenarien. Darstellung als Boxplots.

Resiliente und klimaanfällige Baumarten

38

Als nächstes werden die Unterschiede der Ökosystemdienstleistungsentwicklung unter verschiedenen Klimaszenarien für die Baumarten des CityTree Models untersucht. In Tab. 10 und 11 werden die Ökosystemdienstleistungen Evapotranspirationskühlung und Biomassezuwachs/Kohlenstoffbindung für alle Bäume der Stadt Speyer dargestellt, welche laut Kataster der Baumarten aus dem CityTree Model zugeordnet wurden. Die Dienstleistungen werden für die Zukunftsszenarien beschrieben, in Form von Mittelwert, Standardabweichung (S), Variationskoeffizient (VK) und prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel.

Alle Baumarten verzeichnen Rückgänge des jährlichen Biomassezuwachses in sämtlichen Szenarien (Trockenjahr, RCP 2.6, RCP 8.5) im Vergleich zum aktuellen Zustand (langjährigen Mittel). Die stärksten Verluste finden im Trockenjahr, etwas geringere im RCP 2.6-Szenario, und die geringsten im RCP 8.5-Szenario statt. Diese Trends stimmen mit den stadtweiten Trends überein. Es ist zudem anhand der hohen Variationskoeffizienten von 0,72 bis 1,30 ersichtlich, dass die Bäume innerhalb derselben Art einen stark variierenden Biomassezuwachs aufweisen. Vergleicht man die Rückgänge der unterschiedlichen Baumarten, so sind deutliche Unterschiede erkennbar. Am stabilsten, mit den geringsten gesamten Rückgängen ist *Robinia pseudoacacia*, dicht gefolgt von *Aesculus hippocastanum* und *Fraxinus excelsior*. Die zwei zuletzt genannten Baumarten haben eine mittlere Toleranz gegenüber Trockenheit, während *Robinia pseudoacacia* eine hohe Toleranz besitzt.

Auch die Evapotranspirationskühlung nimmt für die im CityTree Model vorkommenden Baumarten in allen Szenarien im Vergleich zum aktuellen Zustand ab. Im Szenario RCP 8.5 sind für die Evapotranspirationskühlung jedoch deutlich höhere Rückgänge zu verzeichnen als beim Biomassezuwachs. Die Rückgänge im RCP 8.5 Szenario sind dabei nur etwas geringer als im RCP 2.6 Szenario und haben im Vergleich zum langjährigen Mittel die geringsten Verluste der Evapotranspirationskühlung. Auch dieser Trend stimmt mit den stadtweiten Daten überein.

Tab. 10 Evapotranspirationskühlung (kWh im Sommer) nach Baumarten des CityTree Models unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Vgl. L.M. = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel)

Baumart	Evapotranspirationskühlung (Sommer kWh)										
	Langjähriges Mittel		Trockenjahr			RCP 2.6			RCP 8.5		
	\bar{x}	VK	\bar{x}	VK	Vgl. L.M.	\bar{x}	VK	Vgl. L.M.	\bar{x}	VK	Vgl. L.M.
<i>Acer platano-ides</i>	9.077	0,72	6.042	0,72	- 33,4	7.511	0,73	- 17,3	7.757	0,74	- 14,5
<i>Acer pseu-doplata-nus</i>	9.933	0,74	6.044	0,73	- 39,2	7.925	0,74	- 20,2	8.687	0,76	- 12,5
<i>Aesculus hippo-cas-tanum</i>	7.860	0,90	4.586	0,87	- 41,6	6.247	0,88	- 20,5	6.773	0,90	- 13,8
<i>Betula pendula</i>	8.039	0,86	4.398	0,82	- 45,3	6.066	0,84	- 24,5	6.592	0,85	- 18,0
<i>Carpinus betulus</i>	7.480	0,99	4.816	0,98	- 35,6	5.967	1,0	- 20,2	6.060	1,0	- 19,0
<i>Fagus sylvatica</i>	9.736	0,61	6.139	0,60	- 37,0	7.635	0,60	- 21,6	8.084	0,60	- 17,0
<i>Fraxinus excelsior</i>	10.704	73,2	6.885	0,71	- 35,7	8.957	0,73	- 16,3	9.011	0,72	- 15,8
<i>Platanus x acerif-olia</i>	13.368	65,1	9.466	0,64	- 29,2	11.717	0,65	- 12,3	11.868	0,65	- 11,2
<i>Populus nigra 'Italica'</i>	9.306	94,5	5.284	0,92	- 43,2	6.227	0,92	- 33,1	6.324	0,90	- 32,0
<i>Quercus robur</i>	9.438	96,1	6.592	0,95	- 30,2	8.280	0,97	- 12,3	8.357	0,97	- 11,5
<i>Robinia pseu-doaca-cia</i>	9.708	60,9	6.931	0,60	- 28,6	8.648	0,61	- 10,9	8.762	0,60	- 9,7
<i>Tilia cordata</i>	10.397	65,4	6.103	0,63	- 41,3	7.459	0,64	- 28,3	7.535	0,65	- 27,5

Tab. 11 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) nach Baumarten des CityTree Models unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Vgl. L.M. = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel)

Baumart	Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/Jahr)										
	Langjähriges Mittel		Trockenjahr			RCP 2.6			RCP 8.5		
	\bar{x}	VK	\bar{x}	VK	Vgl. L.M.	\bar{x}	VK	Vgl. L.M.	\bar{x}	VK	Vgl. L.M.
<i>Acer platano-ides</i>	10,3	0,82	6,0	0,85	- 42,3	8,5	0,84	- 17,9	9,8	0,84	- 4,9
<i>Acer pseu-doplata-nus</i>	10,7	0,89	5,9	0,95	- 44,9	8,0	0,90	- 25,0	10,1	0,91	- 5,3
<i>Aesculus hippo-cas-tanum</i>	4,8	1,12	3,4	1,21	- 29,4	3,9	1,12	- 18,6	4,5	1,11	- 7,1
<i>Betula pendula</i>	3,6	1,17	1,9	1,20	- 47,1	2,5	1,17	- 30,4	3,2	1,13	- 12,6
<i>Carpinus betulus</i>	7,5	1,07	4,7	1,08	- 36,9	6,2	1,08	- 17,7	6,8	1,09	- 8,9
<i>Fagus sylvatica</i>	8,3	0,87	4,4	0,97	- 46,2	5,8	0,92	- 29,7	7,4	0,82	- 10,3
<i>Fraxinus excelsior</i>	10,6	1,00	6,5	0,99	- 38,7	9,0	0,99	- 14,8	10,1	1,00	- 4,4
<i>Platanus x acerif-olia</i>	11,1	0,74	6,0	0,77	- 46,1	9,6	0,75	- 13,4	10,5	0,75	- 5,2
<i>Populus nigra 'Italica'</i>	11,5	1,19	6,8	1,25	- 41,0	7,9	1,23	- 30,9	8,9	1,19	- 22,7
<i>Quercus robur</i>	6,7	1,26	3,6	1,27	- 45,7	6,0	1,30	- 11,1	6,4	1,28	- 4,0
<i>Robinia pseu-doaca-cia</i>	16,5	0,78	10,2	0,80	- 38,4	15,2	0,79	- 8,3	16,1	0,79	- 2,8
<i>Tilia cordata</i>	15,3	0,72	10,3	0,77	- 32,7	11,7	0,72	- 23,3	13,0	0,73	- 14,9

3.3 Maßnahmen zur Mitigation von Klimaauswirkungen

Die Simulationen der Entsiegelungs- und Bewässerungsmaßnahmen für die Stadtbäume des Katasters in Speyer wurde für Bäume mit einer hohen Versiegelung von ≥ 60 % durchgeführt, das entspricht stadtweit 1.924 der 9.232 Bäume des Katasters. Somit wurden für 21 % der Stadtbäume Maßnahmen simuliert. Die Bäume mit einer hohen Versiegelung sind nahezu ausschließlich als Straßenbegleitgrün vorzufinden (s. Abb. 12). Die größeren Ansammlungen von Bäumen sowohl im Norden als auch im Süden des Stadtgebietes, befinden sich in Einfamilienhauswohnsiedlungen und größeren Wohnkomplexen entlang der Straßen.

Die Bäume, die von einer hohen Versiegelung betroffen sind und für die Maßnahmen simuliert werden unterscheiden sich zudem von allen Bäumen hinsichtlich ihrer strukturellen Eigenschaften (s. Tab. 12). Bei beiden Datensätzen ist der höchste Anteil an Bäumen einer mittleren Trockenheitstoleranz zuzuordnen mit 76,6 % im gesamten Baumbestand und 63,5 % bei den Bäumen mit einer hohen Versiegelung. Jedoch zeigt sich eine verschobene Verteilung der Baumanteile für die einer niedrigen und hohen Toleranz. Die zweitstärkste vertretene Kategorie bei Bäumen mit einer hohen Versiegelung ist die niedrige Toleranzklasse mit 32 %. Betrachtet man den gesamten Baumbestand, so ist die hohe Toleranzklasse mit 17,8 % am zweitstärksten vertreten. Durchschnittlich haben die Bäume, für die Maßnahmen durchgeführt werden, einen niedrigeren Stammdurchmesser und eine niedrigere Wuchshöhe. Der durchschnittliche Sky View Factor (SVF) fällt für diese Bäume leicht höher aus als für den gesamten Baumbestand. Beide SVF-Werte sind jedoch sehr gering, was darauf hindeutet, dass die Bäume kaum Strahlung erhalten und überwiegend verschattet sind.

41

In diesem Kapitel werden Entsiegelung und Bewässerung der stark versiegelten Stadtbäume (ab 60 %) als Anpassungsmaßnahme an den Hitzestress in Speyer simuliert. Zunächst werden die Bäume für die Maßnahmen durchgeführt wurden betrachtet, um den reinen Effekt (Einzelbaumeffekt) der Entsiegelung und Bewässerung auf die Stadtbäume zu quantifizieren. Daraufhin werden die Gesamtergebnisse aller Stadtbäume und der Einfluss, den die 21 % des Baumbestandes für die Maßnahmen simuliert werden auf die Ergebnisse der gesamten Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume in Speyer haben (Gesamtsystemeffekt) betrachtet.

Tab. 12 Vergleich struktureller Eigenschaften der Bäume des Katasters (Gesamt Kataster) mit den Bäumen, welche von einer hohen Versiegelung (ab 60 %) betroffen sind und für die Maßnahmen simuliert werden (≥ 60 % Surface Sealing (SS); Toleranz n = absolute und relative Anzahl Bäume in der jeweiligen Trockenheitstoleranzklasse; dbh = Stammdurchmesser; SVF = Sky View Factor)

Bäume	n	Toleranz n			dbh (cm)		Höhe (m)		SVF	
		niedrig	mittel	hoch	\bar{x}	VK	\bar{x}	VK	\bar{x}	VK
≥ 60 % SS	1.924	618 32 %	1.221 63,5 %	85 4,4 %	10,3	0,86	6,4	0,45	0,15	0,2
Gesamt Kataster	9.232	519 5,6 %	7.073 76,6 %	1.640 17,8 %	28,1	0,84	12,5	0,65	0,14	0,21



Abb. 12 Baumstandorte aus dem Kataster der Stadt Speyer mit einer Versiegelung ab 60 %. Diese Bäume werden für die Simulation der Entseigelungs-, Bewässerungs- und Kombinationsmaßnahmen verwendet.

3.3.1 Potential von Entsiegelungsmaßnahmen

Einzelbaumeffekte der Entsiegelungsmaßnahmen im langjährigen Mittel

Zunächst werden die Entsiegelungsmaßnahmen der stark versiegelten Bäume im langjährigen Mittel simuliert. Dafür wird die Versiegelung der Bäume jeweils um 20, 30 und 50 Prozentpunkte (P. p.) reduziert.

Zu Beginn werden die Einflüsse der Entsiegelungsmaßnahmen auf die Evapotranspirationskühlung analysiert (s. Tab. 13). Bereits eine moderate Entsiegelung von 20 P. p. führt zu einer Steigerung der Evapotranspirationskühlung um 25,8 % gegenüber dem aktuellen Zustand (langjährigen Mittel), während eine Entsiegelung um 50 P. p. eine Zunahme von 64,3 % erzielt. Der mittlere Wert erhöht sich von 900 kWh im Ausgangsszenario auf 1.132 kWh unter 20 P. p. und auf 1.479 kWh unter 50 P. p. Entsiegelung. Eine Entsiegelung um 30 P. p. steigert die mittlere Kühlleistung auf 1.250 kWh (38,9 %).

Tab. 13 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im langjährigen Mittel (L.M.) unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel)

Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränd. (%)
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	
L.M.	85	20.355	64	900	1,77	1.731.904	0
20	65	24.830	90	1.132	1,75	2.178.674	+ 25,8
30	55	26.099	104	1.250	1,73	2.405.887	+ 38,9
50	35	28.638	130	1.479	1,71	2.845.953	+ 64,3

Dieses Muster zeigt sich auch bei Betrachtung des Biomassezuwachses in den diversen Entsiegelungsszenarien. Eine Entsiegelung um 20 P. p. steigert den Biomassezuwachs um 20,5 %, eine Entsiegelung um 30 P. p. führt zu einem Wachstum von 32,2 % im Vergleich zum Ausgangsszenario. Die maximal simulierte Entsiegelung von 50 P. p. führt zur höchsten Steigerung des Biomassezuwachses der Stadtbäume von 62,7 %.

Zusätzlich gibt der Variationskoeffizient (VK) wichtige Hinweise darauf, wie homogen oder heterogen die Ökosystemdienstleistungen der Bäume sind. Mit zunehmender Entsiegelung sinkt der Variationskoeffizient der Evapotranspirationskühlung von 1,77 im langjährigen Mittel zu 1,71 unter einer Entsiegelung von 50 P. p.. Die Streuung beschreibt, dass die Bäume je nach Versiegelungsgrad unterschiedlich stark von der simulierten Entsiegelung profitieren und die Unterschiede mit zunehmender Entsiegelung geringer werden. Die unterschiedlich starke Reaktion je nach Baumart führt voraussichtlich ebenfalls zu einer Streuung der Daten.

Auch beim Biomassezuwachs ist eine Streuung der Daten zu erkennen. Ab einer Entsiegelung von 30 P. p. sinkt der Variationskoeffizient leicht von 2,5 im aktuellen Zustand auf 2,45 ab. Die niedrigste Streuung von 2,36 wird bei einer Entsiegelung von 50 P. p. erreicht. Insgesamt ist die Streuung der Daten zum Biomassezuwachs deutlich höher als die der Evapotranspirationskühlung.

Tab. 14 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum langjährigen Mittel)

Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränd. (%)
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	
L.M.	85	43,8	0,0022	0,84	2,50	1.609	0
20	65	53,5	0,0022	1,0	2,50	1.939	+ 20,5
30	55	58,8	0,0023	1,1	2,45	2.127	+ 32,2
50	35	66,8	0,0023	1,4	2,36	2.618	+ 62,7

Einzelbaumeffekte der Entsiegelungsmaßnahmen im Klimaszenario RCP 8.5

Daraufhin werden die Maßnahmen im zukünftigen Klimaszenario RCP 8.5 betrachtet. Unter den veränderten Klimabedingungen des Szenarios reduziert sich die Evapotranspirationskühlung der hochversiegelten Bäume in Speyer um 23 % im Vergleich zum aktuellen Klima (s. Tab. 15). Entsiegelungsmaßnahmen führen jedoch zu deutlichen Steigerungen der Kühlleistung im Vergleich zum Basisszenario RCP 8.5. Bereits eine Entsiegelung von 20 P. p. führt zu einem Anstieg von 23 %, während eine Entsiegelung von 30 P. p. eine Steigerung von 37 % bewirkt. Der größte Effekt ist bei einer Entsiegelung von 50 P. p. zu erkennen, welche zu einem 71-prozentigen Anstieg der Evapotranspirationskühlung führt. Die Standardabweichung steigt über alle Entsiegelungsszenarien hinweg an, während der Variationskoeffizient konstant bei einem Wert von 1,75 bleibt. Wird die Veränderung der Kühlleistung in den Entsiegelungsszenarien mit dem langjährigen Mittel ohne Maßnahmen verglichen, zeigt sich, dass die Werte im langjährigen Mittel ab einem Entsiegelungsgrad von 30 P. p. übertroffen werden. Bei einer Entsiegelung von 20 P. p. ist die Kühlleistung im RCP 8.5 um 6 % geringer als im langjährigen Mittel ohne durchgeführte Maßnahmen. Im Vergleich zu den aktuellen Klimabedingungen steigert die Entsiegelung von Bäumen die Evapotranspirationskühlung unter pessimistischen Klimabedingungen um maximal 31 % bei einer Entsiegelung von 50 P. p.. Dadurch können die Verluste der Ökosystemdienstleistung, welche durch den Klimawandel ausgelöst werden, ausgeglichen und die Leistung der Bäume im Vergleich zu den aktuellen Bedingungen sogar gesteigert werden.

Tab. 15 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5 unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränderung (%)	
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	85	20.355	64	900	1,77	1.731.904	+ 30	0
RCP 8.5	85	14.791	59	689	1,75	1.325.568	0	- 23
20	65	18.248	67	846	1,75	1.628.970	+ 23	- 6
30	55	20.517	75	947	1,75	1.821.936	+ 37	+ 5
50	35	25.910	95	1.179	1,75	2.268.769	+ 71	+ 31

Der Biomassezuwachs der stark versiegelten Bäume in Speyer steigt ebenfalls mit der Höhe der Entsiegelung an (s. Tab. 16). Der größte Zuwachs dieser Ökosystemdienstleistung von 61 % wird im Vergleich zum Klimaszenario RCP 8.5 (ohne Maßnahmen) erzielt. Im Gegensatz zur Evapotranspirationskühlung wird bereits durch die niedrigste Entsiegelung von 20 P. p. eine Steigerung von 7 % im Vergleich zum langjährigen Mittel erreicht. Der maximale Zuwachs der Ökosystemdienstleistung im Vergleich zum langjährigen Mittel wird durch eine Entsiegelung von 50 P. p. mit 45 % erreicht. Bei der Entwicklung des Biomassezuwachses ist eine Steigerung der Standardabweichung festzustellen. Der Variationskoeffizient sinkt bei einer Entsiegelung von 20 P. p. auf 2,47 und bei einer Entsiegelung von 30 P. p. auf 2,42. Bei der stärksten Entsiegelung von 50 P. p. steigt die Streuung der Daten auf 2,48.

Tab. 16 Darstellung der Einzelbaumeffekte. Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5 unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20 P. p., 30 P. p., 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 %. (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

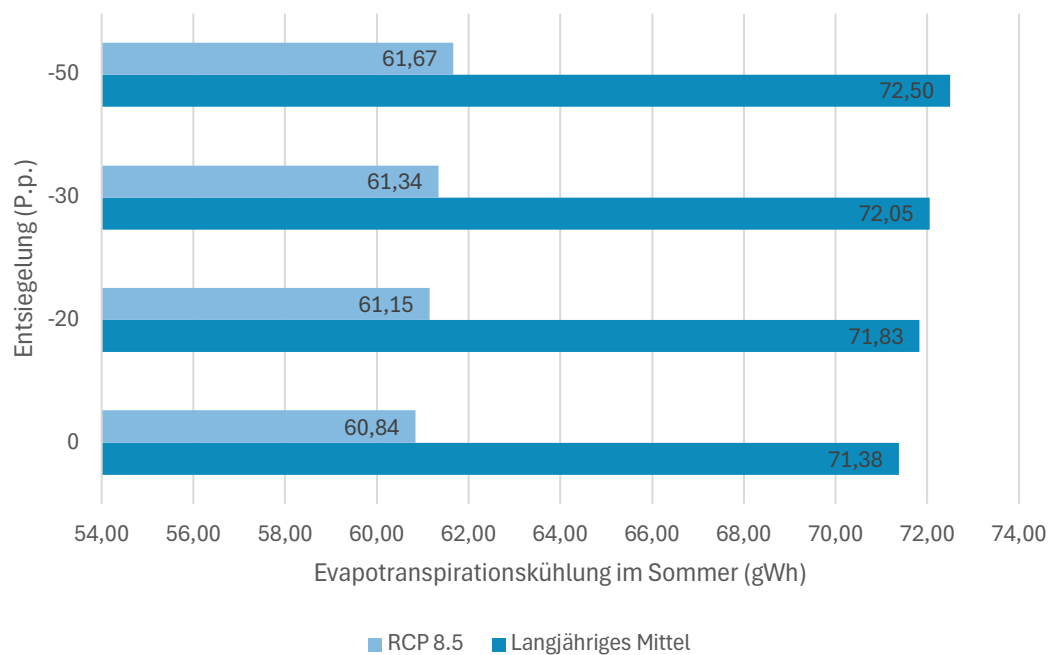
Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)	
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	85	43,8	0	0,84	2,50	1.609	+ 11	0
RCP 8.5	85	43,3	0	0,80	2,50	1.449	0	- 10
20	65	47,4	0	0,89	2,47	1.729	+ 19	+ 7
30	55	51,0	0	0,99	2,42	1.899	+ 31	+ 18
50	35	66,9	0	1,21	2,48	2.342	+ 61	+ 45

Gesamtsystemeffekt der Entsiegelungsmaßnahmen im langjährigen Mittel und RCP8.5

Betrachtet man den Einfluss der entsiegelten Bäume gemeinsam mit den Bäumen für die keine Maßnahmen angesetzt wurden, so ist ersichtlich, dass unter zunehmender Entsiegelung die Ökosystemdienstleistungen der Bäume ebenfalls steigen, jedoch zu einem deutlich geringeren Anteil (s. Abb. 13). Das lässt sich dadurch erklären, dass nur 21 % der Bäume entsiegelt wurden, wobei diese Bäume ihre Leistungen um ca. 20 bis 64 % steigern können. Dieser Zuwachs verteilt sich auf den gesamten Baumbestand, (die übrigen 79 %) der keine Steigerungen der Ökosystemdienstleistungen erfährt. Die Maßnahmen haben demnach eine große lokale Wirkung und eine geringe relative Wirkung im Gesamtstadtbaumsystem in Speyer.

Die Steigerung beider Ökosystemdienstleistungen ist unter aktuellen Klimabedingungen, bei einer Entsiegelung von 50 P. p. am stärksten. Die geringste Steigerung beider Ökosystemdienstleistungen ist bei einer Entsiegelung von 20 P. p. zu beobachten.

Betrachtet man die Evapotranspirationskühlung aller Bäume im Klimaszenario RCP 8.5, so führen die Entsiegelungsmaßnahmen der hochversiegelten Bäume auch hier zu einem geringen Anstieg der Gesamtleistung der Bäume in Speyer. Die stärksten Gesamtzuwächse von 1,4 % im Vergleich zum Basisszenario RCP 8.5 werden bei einer Entsiegelung von 50 P. p. erreicht. Eine Entsiegelung von 20 P. p. führt zu einem Gesamtanstieg der Evapotranspirationskühlung von 0,5 % und eine Entsiegelung von 30 P. p. zu einem Anstieg von 0,8 %.

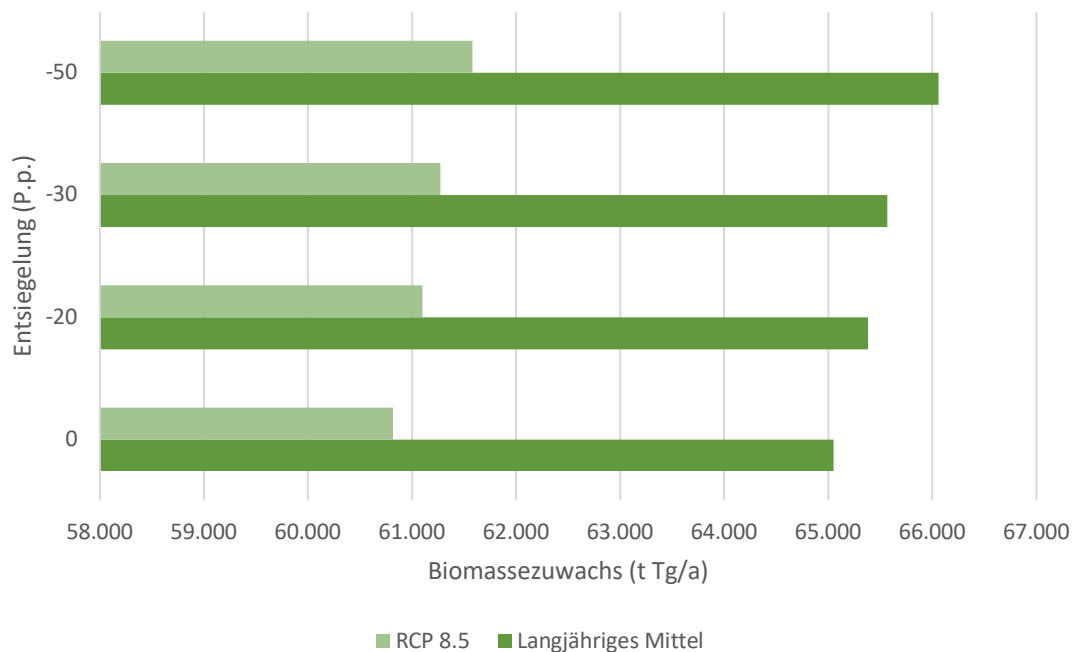


	Entsiegelungsszenarien (P. p.)			
Veränderung vgl. Basisszenario (%)	0	- 20	- 30	- 50
Langjähriges Mittel	0	0,6	1	1,6
RCP 8.5	0	0,5	0,8	1,4

Abb. 13 Evapotranspirationskühlung im Sommer (GWh) der Bäume des Baumkatasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Entsiegelungsmaßnahmen (- 20, -30 und -50 P. p.)

Das gleiche Bild zeigt sich bei Betrachtung des Biomassezuwachses der Bäume in Speyer unter verschiedenen Entsiegelungsszenarien im langjährigen Mittel (s. Abb. 14). Mit zunehmender Entsiegelung der Böden unter den stark versiegelten Bäumen steigt der gesamte Biomassezuwachs an. Bei einer Entsiegelung von 50 P. p. wird der höchste Biomassezuwachs von 1,5 % im Vergleich zum langjährigen Mittel erreicht. Wie auch bei der isolierten Betrachtung der Bäume, für die Maßnahmen durchgeführt wurden, wird auch bei der Gesamtbetrachtung der größte Zuwachs im langjährigen Mittel erreicht.

Auch im Klimaszenario RCP 8.5 wird der gesamte Biomassezuwachs durch Entsiegelungsmaßnahmen von stark versiegelten Bäumen gesteigert. Die höchste Steigerung ist bei einer Entsiegelung um 50 P. p. mit 1,2 %, die niedrigste Steigerung bei einer Entsiegelung von 20 P. p. mit 0,4 % zu sehen.

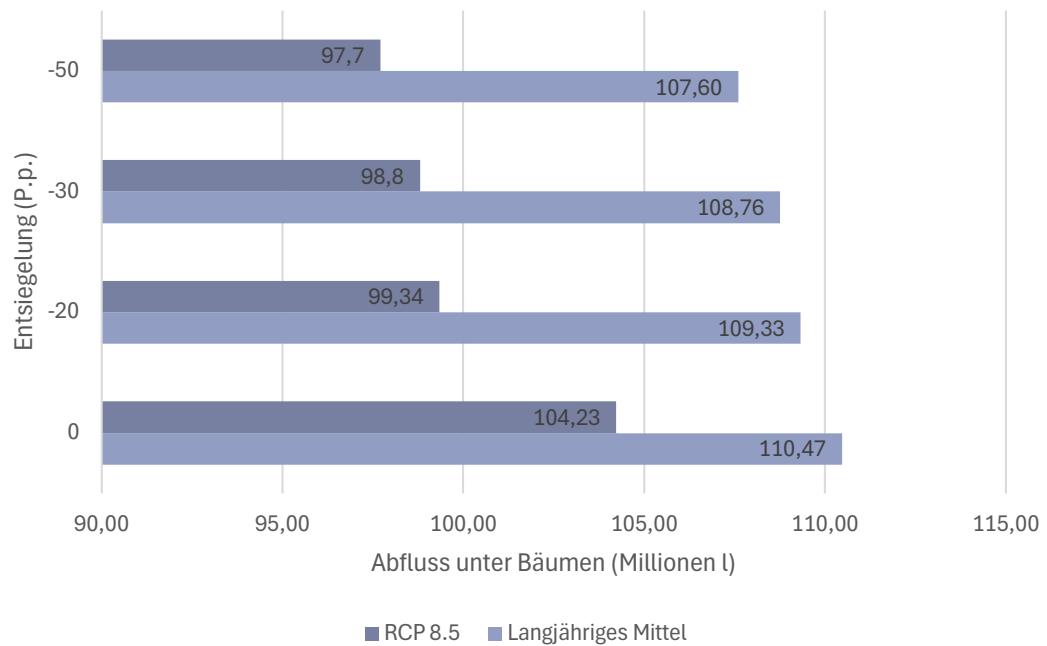


Veränderung vgl. Basisszenario (%)	Entsiegelungsszenarien (P. p.)			
	0	- 20	- 30	- 50
Langjähriges Mittel	0	0,5	0,8	1,5
RCP 8.5	0	0,4	0,7	1,2

48

Abb. 14 Biomassezuwachs (t Tg/a) der Bäume des Baumkatasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Entsiegelungsmaßnahmen (- 20, -30 und -50 P. p.)

Betrachtet man den Abfluss unter den Bäumen, so zeigt sich ein gegenteiliges Bild (s. Abb. 15). Der Abfluss unter den Bäumen nimmt bei zunehmender Entsiegelung kontinuierlich ab. Unter aktuellen Klimabedingungen wird die größte Reduktion bei einer Entsiegelung von 50 P. p. mit 2,5 % erreicht. Im RCP 8.5-Szenario ist der Rückgang des Abflusses deutlich stärker als im langjährigen Mittel. Der maximale Rückgang von 6,2 % ist bei einer Entsiegelung von 50 P. p. im RCP 8.5-Szenario zu beobachten.



Veränderung vgl. Basisszenario (%)	Entsiegelungsszenarien (P. p.)			
	0	- 20	- 30	- 50
Langjähriges Mittel	0	- 1	- 1,5	- 2,5
RCP 8.5	0	- 4,7	- 5,2	- 6,2

Abb. 15 Abfluss (Millionen l) unter den Bäumen des Baumkatasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Entsiegelungsmaßnahmen (- 20, -30 und -50 P. p.)

3.3.2 Potential von Bewässerungsmaßnahmen

Nachdem die Entsiegelungsmaßnahmen behandelt wurden, ist dieser Abschnitt den Bewässerungsmaßnahmen gewidmet. Auch bei diesen Maßnahmen werden zunächst die Effekte der hochversiegelten Bäume und danach die Gesamtsystemeffekte betrachtet.

Einzelbaumeffekte der Bewässerungsmaßnahmen im langjährigen Mittel

Bei den Ökosystemdienstleistungen zeigt sich wie schon zuvor bei der Entsiegelung eine durchweg positive Entwicklung der Evapotranspirationskühlung und des Biomassezuwachses der Bäume durch Bewässerung. Jedoch werden bei Bewässerung etwas höhere Zuwächse erreicht. Die höchste Steigerung der Evapotranspirationskühlung von 75 % findet bei einer Bewässerung von 250 l pro Baum und Woche statt (s. Tab. 17). Nennenswert ist, dass die Hälfte der Bewässerungsmenge zu einer verhältnismäßig höheren Steigerung der Kühlungsleistung von 53,5 % führt. Eine um 56 % geringere Bewässerungsmenge von 80 l pro Woche und Baum führt jedoch zu einer vergleichsweise hohen Kühlungsleistung von 41,9 %. Die Variationskoeffizienten sinken mit zunehmender Bewässerung auf bis zu 1,29 bei einer Zugabe von 250 Liter.

Der gleiche Trend zeigt sich bei der Entwicklung des Biomassezuwachses unter Betrachtung diverser Bewässerungsmaßnahmen (s. Tab. 18). Der höchste Anstieg ist bei einer Bewässerung von 250 l pro Baum und Woche zu verzeichnen. Die Hälfte der Bewässerungsmenge führt auch bei dieser Ökosystemdienstleistung zu einem verhältnismäßig höheren Zuwachs. Die Variationskoeffizienten sinken mit zunehmender Bewässerung auf bis zu 1,85 bei einer Zugabe von 250 Liter. Die Streuung der Werte ist beim Biomassezuwachs somit höher als bei der Evapotranspirationskühlung.

Tab. 17 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel)

Bewässerung (l/Baum/ Woche)	Gesamte Bewässerung Σ (l/a)	Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränd. (%)
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	
0	0	20.355	64	900	1,77	1.731.904	0
80	2.022.948	20.924	191	1.277	1,31	2.457.188	+ 41,9
125	3.160.857	21.243	191	1.382	1,28	2.659.143	+ 53,5
250	6.321.714	22.133	191	1.575	1,29	3.030.157	+ 75,0

Tab. 18 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM)

Bewässerung (l/Baum/W oche)	Gesamte Bewässerung Σ (l/a)	Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a)					Veränd. (%)
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	
0	0	43,8	0	0,84	2,50	1.609	0
80	2.022.948	44,3	0	1	2,10	1.999	+ 24,2
125	3.160.857	44,5	0	1,1	2,00	2.169	+ 34,8
250	6.321.714	45,5	0	1,3	1,85	2.535	+ 57,5

Einzelbaumeffekte der Bewässerungsmaßnahmen im Klimaszenario RCP 8.5

Nachdem die Auswirkungen verschiedener Bewässerungsmaßnahmen auf die Ökosystemdienstleistungen der Bäume im langjährigen Mittel betrachtet wurden, erfolgt nun die Analyse unter den Bedingungen des Klimaszenarios RCP 8.5.

Die Evapotranspirationskühlung steigt mit zunehmender Bewässerungsmenge unter dem RCP 8.5-Szenario stark an (s. Tab. 19). Während im unbewässerten RCP 8.5-Szenario die Summe der Kühlleistung um 23 % im Vergleich zum langjährigen Mittel sinkt, führt bereits die niedrigste Bewässerungsstufe von 80 l pro Baum und Woche zu einer deutlichen Leistungsverbesserung. Die mittlere Evapotranspirationskühlung steigt um

58 % gegenüber dem RCP 8.5 und 21 % gegenüber dem langjährigen Mittel an. Der Effekt verstärkt sich bei zunehmender Bewässerungsintensität. Bei 250 l pro Woche wird die Kühlleistung mit 2,85 GWh mehr als verdoppelt (115 % im Vergleich zu RCP 8.5). Die Streuung der Evapotranspirationskühlung ist bei einer Bewässerungsmenge von 125 Liter mit 1,02 am geringsten.

Tab. 19 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Bewässerung (l/Baum/Woche)	Gesamte Bewässerung Σ (l/a)	Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränderung (%)	
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L. M.	0	20	64	900	1,77	1.731.904	+ 30	0
RCP 8.5	0	14.791	59	689	1,75	1.325.568	0	- 23
80	2.022.948	14.967	220	1.088	1,08	2.093.395	+ 58	+ 21
125	3.160.857	15.182	220	1.223	1,02	2.354.190	+ 77	+ 36
250	6.321.714	15.812	220	1.484	1,03	2.855.069	+ 115	+ 64

Auch der Biomassezuwachs steigt zunehmend mit der Bewässerungsmenge um bis zu 60 % an (s. Tab. 20). Während dieser im unbewässerten RCP 8.5-Szenario bei 1.449 kg liegt (-10 % im Vergleich zum langjährigen Mittel), führt eine Bewässerung von 80 l pro Baum und Woche bereits zu einer Erhöhung auf 1.786 kg, was einem Zuwachs von 23 % gegenüber dem RCP 8.5-Szenario und 11 % gegenüber dem langjährigen Mittel entspricht. Dieser Trend führt sich über die weiteren Bewässerungsszenarien fort. Die Bewässerungsvariante von 250 l pro Woche erhöht die Biomasseproduktion um 60 % gegenüber dem RCP 8.5-Szenario. Der Variationskoeffizient nimmt bei zunehmender Bewässerung ab.

Tab. 20 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im langjährigen Mittel unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125, 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

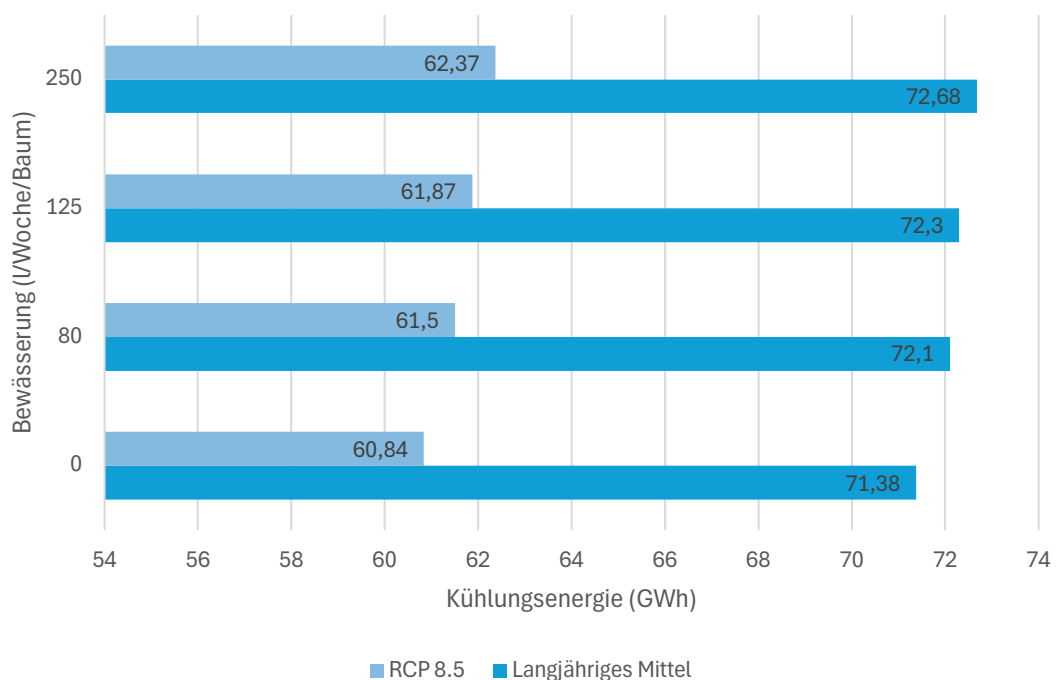
Bewässerung (l/Baum/Woche)	Gesamte Bewässerung Σ (l/a)	Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a)					Veränderung (%)	
		Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
0	0	43,8	0	0,84	2,5	1.609	+ 11	0
RCP 8.5	0	43,0	0	0,80	2,5	1.449	0	- 10
80	2.022.948	42,9	0	0,92	2,1	1.786	+ 23	+ 11
125	3.160.857	42,9	0	1,02	1,9	1.955	+ 35	+ 21
250	6.321.714	43,4	0	1,21	1,7	2.328	+ 60	+ 44

Gesamtsystemeffekt der Bewässerungsmaßnahmen im langjährigen Mittel und RCP 8.5

Als nächstes werden die Gesamtsystemeffekte der Bewässerungsmaßnahmen auf die Ökosystemdienstleistungen im langjährigen Mittel und im Klimaszenario RCP 8.5 thematisiert (s. Abb. 16 und Abb. 17).

Die Bewässerungsmaßnahmen im langjährigen Mittel führen zu einer Steigerung der gesamten Kühlungsenergie von 71,38 GWh ohne Bewässerung auf 72,68 GWh bei der höchsten Bewässerungsmenge von 250 Liter pro Baum und Woche. Dies entspricht einer relativen Steigerung von bis zu 1,8 % im Vergleich zum Ausgangsszenario. Geringere Bewässerungsmengen (80 und 125 Liter) führen zu moderaten Verbesserungen von 1,0 % bzw. 1,3 %.

Unter den Bedingungen des Klimaszenarios RCP 8.5 fällt die absolute Evapotranspirationskühlung deutlich geringer aus. Sie beträgt 60,84 GWh ohne Bewässerung und steigt mit zunehmender Bewässerungsintensität auf bis zu 62,37 GWh bei 250 Liter pro Woche. Trotz der niedrigeren absoluten Werte im Vergleich zum langjährigen Mittel sind die relativen Zunahmen stärker ausgeprägt. Die prozentualen Zuwächse betragen 1,1 % (80 Liter), 1,7 % (125 Liter) und erreichen bis zu 2,5 % bei 250 Liter pro Woche.

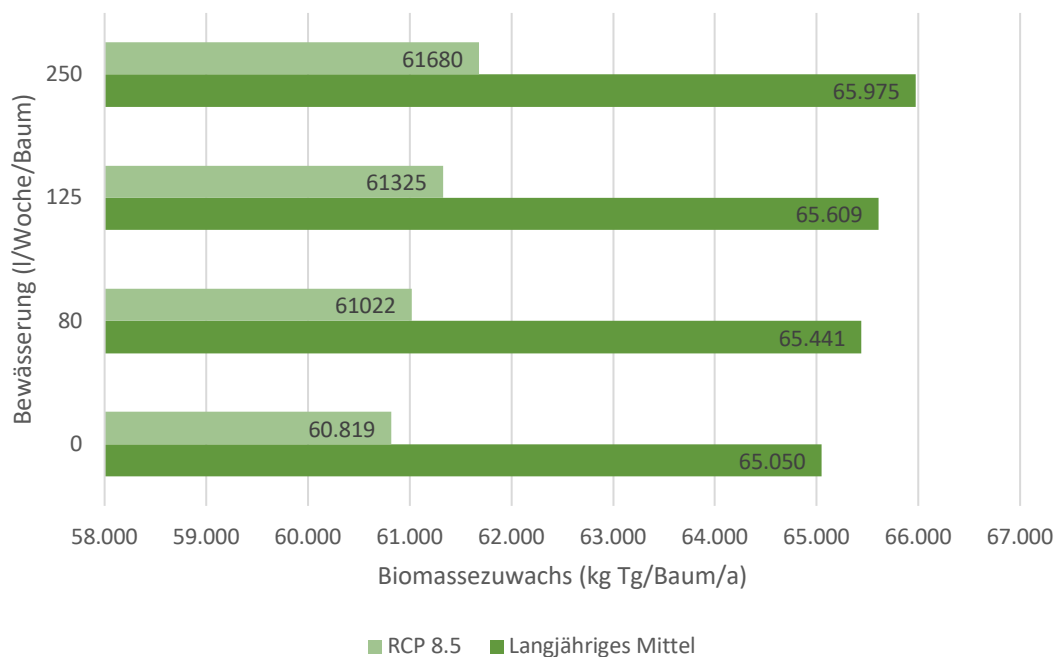


	Bewässerung (l/Baum/Woche)			
Veränderung vgl. Basisszenario (%)	0	80	125	250
Langjähriges Mittel	0	1,0	1,3	1,8
RCP 8.5	0	1,1	1,7	2,5

Abb. 16 Evapotranspirationskühlung (GWh) der Bäume des Katasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Bewässerungsszenarien (80, 125 und 250 l/Baum/Woche)

Die Auswertung des gesamten Biomassezuwachses der Stadtbäume in Speyer unter variierender Bewässerung von stark versiegelten Bäumen zeigt eine moderate Steigerung der Ökosystemdienstleistung bei zunehmender Bewässerung (s. Abb. 17). Ohne zusätzliche Bewässerung beträgt der jährliche Biomassezuwachs im langjährigen Mittel rund 65.050 kg Trockengewicht, während eine wöchentliche Zugabe von 80 Liter pro Baum zu einer Steigerung von 0,6 % führt (65.441 kg). Eine intensivere Bewässerung von 125 Liter pro Woche verstärkt diesen Effekt auf 0,8 % (65.609 kg). Die höchste Bewässerungsmenge von 250 Liter pro Woche führt zu einem maximalen Zuwachs von 65.975 kg (1,4 %). Die Anstiege des Biomassezuwachses stehen jedoch in keinem Verhältnis zum Anstieg der Bewässerungsmenge. So führt die mehr als Verdopplung der Wassermenge von 80 auf 125 l pro Woche zu einer 0,2-prozentigen Steigerung des Biomassezuwachses.

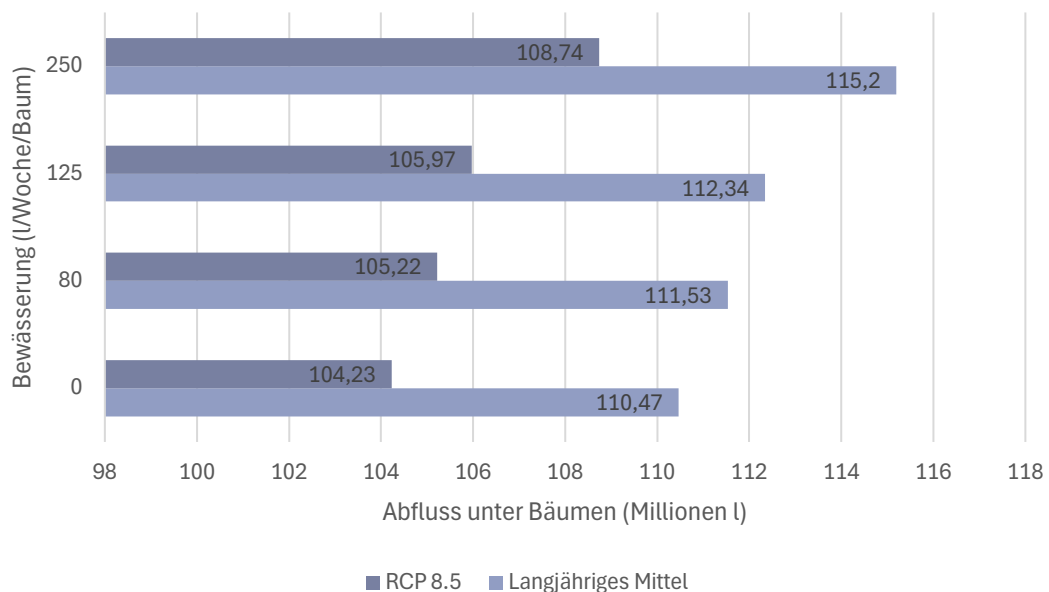
Die Ergebnisse zeigen, dass der Biomassezuwachs auch unter klimatischen Belastungen im RCP 8.5-Szenario positiv auf Bewässerung reagiert. Bereits mit der niedrigsten Bewässerungsmenge von 80 l pro Baum und Woche sind Steigerungen von 0,3 % im gesamten Biomassezuwachs zu beobachten. Das höchste Wachstum von 0,6 % wird bei einer Zugabe von 250 l pro Baum und Jahr erzielt. Dieser Wert ist geringer als die prozentuale Steigerung des Biomassezuwachses im langjährigen Mittel.



	Bewässerung (l/Baum/Woche)			
Veränderung vgl. Basisszenario (%)	0	80	125	250
Langjähriges Mittel	0	0,6	0,8	1,4
RCP 8.5	0	0,3	0,5	0,6

Abb. 17 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) der Bäume des Katasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Bewässerungsszenarien (80, 125 und 250 l/Baum/Woche)

Zuletzt wird das Abflussverhalten unter verschiedenen Bewässerungsszenarien im langjährigen Mittel und dem Klimaszenario RCP 8.5 betrachtet (s. Abb. 18). Auffallend ist, dass die relative Abflussentwicklung für beide Szenarien gleich ausfällt, wobei das Klimaszenario deutlich niedrigere absolute Werte aufweist. Insgesamt ist ein deutlicher Anstieg des Abflusses von bis zu 4,3 % bei 250 l pro Woche und Baum im Vergleich zum unbewässerten Szenario festzustellen.



	Bewässerung (l/Baum/Woche)			
Veränderung vgl. Basisszenario (%)	0	80	125	250
Langjähriges Mittel	0	0,9	1,7	4,3
RCP 8.5	0	0,9	1,7	4,3

Abb. 18 Abflussverhalten (Millionen l) unter den Bäumen des Katasters in Speyer im langjährigen Mittel und dem RCP 8.5-Szenario unter diversen Bewässerungsszenarien (80, 125 und 250 l/Baum/Woche)

3.3.3 Potential von kombinierten Maßnahmen

Einzelbaumeffekte der kombinierten Maßnahmen im Klimaszenario RCP 8.5

Es werden außerdem kombinierte Maßnahmen aus Entsiegelung und Bewässerung getestet. Dabei soll herausgefunden werden, ob Bewässerung eine geeignete Ergänzung zu Entsiegelungsmaßnahmen als Mitigation der klimatischen Veränderungen für die stark versiegelten Bäume der Stadt Speyer sein kann. Die simulierten Kombinationsmaßnahmen bestehend aus einer Entsiegelung um 50 Prozentpunkte und zusätzlicher Bewässerung von 80 und 250 Liter pro Baum und Woche. Sie werden ausschließlich für das Zukunftsszenario RCP 8.5 modelliert. Auf diese Weise soll erforscht werden, ob die Kombination beider Maßnahmen unter den zukünftigen klimatischen

Bedingungen in der Lage ist, die Leistungsfähigkeit und das Wachstum der Bäume wirksam zu verbessern.

In der Tab. 21 werden die kombinierten Szenarien mit einer Entsiegelung um 50 P. p. und einer Bewässerung von 80l und 250 l pro Baum und Woche für die betroffenen Bäume dargestellt. Wird eine Entsiegelungsmaßnahme in Kombination mit Bewässerung simuliert, zeigt sich eine starke Verbesserung beider Ökosystemdienstleistungen. Die Wassermenge von 80 Liter pro Woche und Baum führt bereits zu einer sehr starken Zunahme der Evapotranspirationskühlung. Unter dieser kombinierten Maßnahme steigt die mittlere Kühlleistung auf 1.597 kWh pro Baum an und erreicht eine Gesamtkühlleistung von 2,86 Mio. kWh. Das entspricht einem Zuwachs von 116 % im Vergleich zum Ausgangsszenario (RCP 8.5). Die höchste Bewässerung von 250 Liter pro Woche verstärkt diesen Effekt weiter. Die mittlere Kühlleistung steigt auf 1.918 kWh und die Gesamtkühlleistung auf 3,69 Mio. kWh, was einem Zuwachs von 178 % entspricht.

Tab. 21 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen bestehend aus Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Entsiegelung (P. p.) & Bewässerung (l/Baum/Woche)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Gesamte Bewässerung Σ (l/a)	Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränderung (%)
			Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	
L.M.	85	0	20.355	64	900	1,77	1.731.904	+ 30
RCP 8.5	85	0	14.791	59	689	1,75	1.325.568	0
50 & 80	35	1.885.211	26.563	220	1.597	1,34	2.863.605	+ 116
50 & 250	35	6.321.714	27.949	220	1.918	1,35	3.690.560	+ 178

Auch bei Betrachtung des Biomassezuwachses ist bei den kombinierten Maßnahmen eine deutliche Zunahme zu beobachten (s. Tab. 22). Mit 80 Liter Bewässerung pro Baum und Woche steigt der mittlere Biomassezuwachs auf 1,56 kg und die Summe auf 2.801 kg. Das entspricht einem Zuwachs von 93 % im Vergleich zum Basisszenario RCP 8.5. Bei 250 Liter pro Baum und Woche erreicht der Biomassezuwachs durchschnittlich 1,86 kg pro Baum und eine Summe von 3.581 kg, was einer Steigerung von 147 % entspricht.

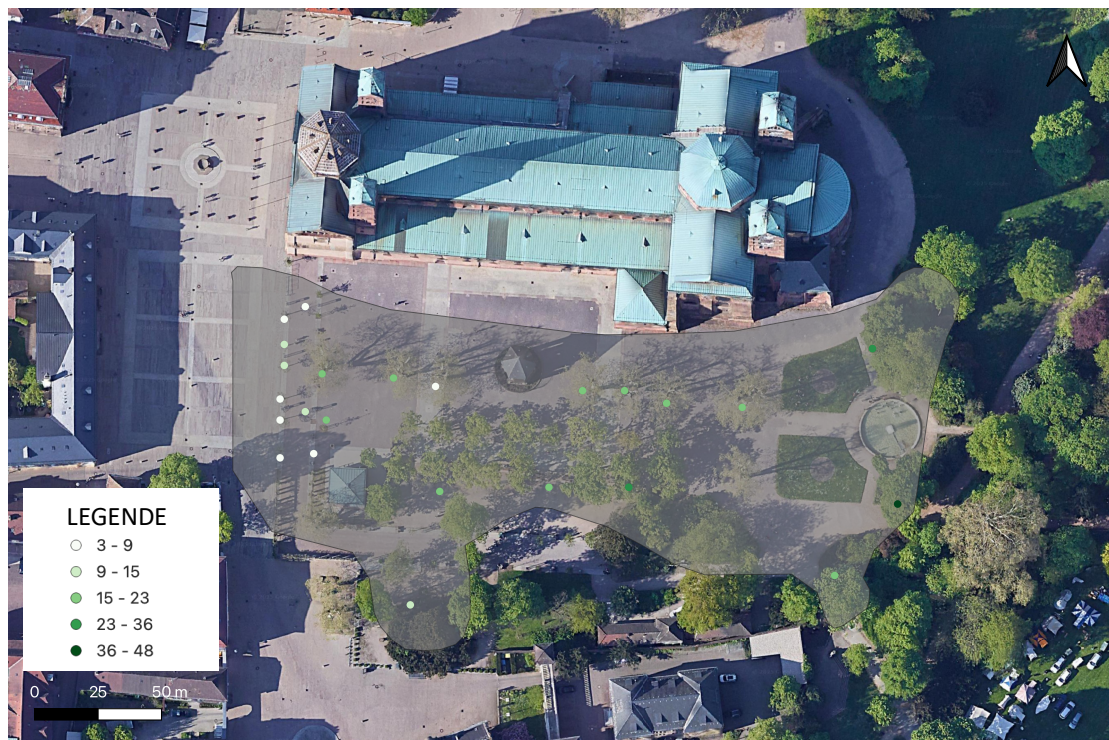
Tab. 22 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen bestehend aus Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Entsiegelung (P. p.) & Bewässerung (l/Baum/Woche)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Gesamte Bewässerung Σ (l/a)	Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)
			Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	
L.M.	85	0	43,8	0	0,84	2,5	1.609	+ 11
RCP 8.5	85	0	43	0	0,80	2,5	1.449	0
50 & 80	35	1.885.211	69	0	1,56	2,1	2.801	+ 93
50 & 250	35	6.321.714	72	0	1,86	1,9	3.581	+ 147

3.4 Fokusort Domplatz

Charakterisierung des Baumbestandes

Als Fokusort wird ein ausgewählter Bereich des Domplatzes, mit einem Ausmaß von 9.916 m² definiert. In diesem Bereich steht ein Großteil der im Baumkataster erfassten Bäume. Von sieben Platanen ist die Baumart im Kataster nicht angegeben, die zugehörige Baumart wurde jedoch durch den Baumexperten Herr Prof. Dr. Rötzer vor Ort bestimmt und somit in die Simulation aufgenommen. Insgesamt befinden sich auf der Fläche 24 Bäume, welche für die Analyse verwendet werden (s. Abb. 19).



57

Abb. 19 Fokusstandort Domplatz. Baumstandorte und deren Stammdurchmesser (cm). Klassenbildung nach Quantilen.

Am Domplatz dominiert die Art *Crataegus laevigata* 'Paul's Scarlet' mit neun Individuen. Diese ist nicht im CityTree Model enthalten und wird daher der Modellbaumart *Quercus robur* zugeordnet. Diese Art macht 37,5 % des Baumbestandes am Fokusstandort aus und prägt somit den Platz. Die häufigste im CityTree Model beinhaltete Baumart ist *Platanus × acerifolia*, die mit sieben Individuen ebenfalls einen Großteil des Gesamtbestandes ausmacht (29 %).

Hinsichtlich der Trockenheitstoleranz zeigt sich eine deutliche Tendenz. Über die Hälfte der Bäume (62,5 %) verfügen über eine mittlere Trockenheitstoleranz, während die übrigen 37,5 % einer hohen Trockenheitstoleranz zugeordnet sind.

Die Mittelwerte der Stammdurchmesser zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Arten (s. Tab 23). Die Baumart mit dem kleinsten durchschnittlichen Stammdurchmesser ist die Baumart *Crataegus laevigata* 'Paul's Scarlet' mit 7,8 cm, die Art *Carpinus betulus* hingegen besitzt den höchsten durchschnittlichen Stammdurchmesser mit 47,7 cm. Die Baumart *Fagus sylvatica* ist nur durch ein Exemplar auf dem Domplatz vertreten und besitzt einen hohen Stammdurchmesser von 35,5 cm. Die hohe Streuung (Variationskoeffizient VK) des Stammdurchmessers, insbesondere bei *Crataegus laevigata* 'Paul's Scarlet' mit 46,2 %, sowie bei *Acer platanoides* mit 24,7 % weist darauf hin, dass am Domplatz Individuen unterschiedlicher Wachstumsstadien vorkommen.

Die Standortfaktoren hingegen ähneln sich zwischen den Arten. Der Sky View Factor (SVF), liegt im Mittel für alle Arten bei sehr niedrigen Werten (0,1 – 0,2), was auf eine starke Beschattung durch umgebende Strukturen, insbesondere dem sich in unmittelbarer Nähe befindenden Dom schließen lässt. Die Baumart *Acer pseudoplatanus* zeigt mit einem Variationskoeffizienten von 17,3 % die höchste Spannweite der SVF aller Baumarten, was auf leicht unterschiedliche Mikrostandorte der zwei einzelnen Bäume innerhalb des Platzes hindeutet. Die Versiegelung der Baumstandorte variiert ebenfalls je nach Baumart. Während einige Arten wie *Tilia cordata*, *Carpinus betulus* und *Fagus sylvatica* auf vollständig unversiegelten Standorten stehen, sind andere stärker versiegelt. Besonders hoch fällt die mittlere Versiegelung bei *Crataegus laevigata* 'Paul's Scarlet' aus, welche im Mittel eine 94,2-prozentige Versiegelung verzeichnen. Auch *Acer pseudoplatanus* weist eine hohe mittlere Versiegelung von 62,7 % auf.

Tab. 23 Eigenschaften der Bäume am Fokusstandort Domplatz (Baumart; dbh = Stammdurchmesser; SVF = Sky View Factor; S = Standardabweichung)

Baumarten am Domplatz	Mittlerer dbh	S dbh	Mittlerer SVF	S SVF	Mittlere Versiegelung	S Versiegelung
<i>Acer platanoides</i>	25,9	6,4	0,1	0,0	36,0	11,4
<i>Acer pseudoplatanus</i>	15,9	1,4	0,1	0,0	62,7	20,8
<i>Carpinus betulus</i>	47,7	0,0	0,2	0,0	1,8	0,0
<i>Crataegus laevigata</i> 'Paul's Scarlet'	7,8	3,6	0,1	0,0	94,2	2,1
<i>Platanus x acerifolia</i>	16,2	3,4	0,2	0,0	48,1	26,9
<i>Fagus sylvatica</i>	35,5	0,0	0,1	0,0	40,2	0,0
<i>Tilia cordata</i>	18,8	0,0	0,1	0,0	15,6	0,0

Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen Bedingungen und Klimaszenarien

Zunächst werden unter den Bedingungen des langjährigen Mittels die Ökosystemdienstleistungen von insgesamt zwölf stark versiegelten Bäumen (≥ 60 % Versiegelung) simuliert. Die Evapotranspirationskühlung erreicht eine gesamte Kühlleistung von 32,9 MWh, während der mittlere Biomassezuwachs bei 31,3 kg Tg/a liegt. Die Leistung aller betrachteten Bäume beträgt 180,2 MWh und der Biomassezuwachs 172,7 kg Tg/a. Im Klimaszenario RCP 8.5 ist ein deutlicher Rückgang der Kühlleistung

von stark versiegelten Bäumen zu beobachten. Die Gesamtsumme der Evapotranspirationskühlung stark versiegelter Bäume sinkt auf 24,9 MWh, was einem Verlust von 24 % im Vergleich zum langjährigen Mittel entspricht. Beim Biomassezuwachs hingegen sind geringere Rückgänge zu verzeichnen. Die Gesamtsumme reduziert sich um 9 % auf 28,3 kg Tg/a. Betrachtet man die Entwicklung für alle Bäume am Domplatz unter klimatischen Veränderungen so sind in diesem Fall geringere Verluste von 18 % bei der Evapotranspirationskühlung und 7 % beim Biomassezuwachs zu beobachten.

Wie zuvor stadtweit stellt sich auch am Domplatz die Frage, ob diese im Zukunftsszenario beobachteten Rückgänge durch Entsiegelungs- und Bewässerungsmaßnahmen zu mindern oder gänzlich kompensierbar sind.

Potential von Entsiegelungsmaßnahmen

Um herauszufinden, wie sich Entsiegelungsmaßnahmen auf die Ökosystemdienstleistungen der stark versiegelten Bäume und den gesamten Baumbestand am Domplatz auswirken, wurden jeweils drei verschiedene Maßnahmen simuliert, eine Entsiegelung um 20, 30, sowie um 50 Prozentpunkte. Der Fokus wird dabei auf die Analyse der stark versiegelten Bäume gelegt.

Die Ergebnisse in Tab. 24 zeigen, dass bereits eine geringe Entsiegelung von 20 P. p. im Szenario RCP 8.5 zu einer Erhöhung der Evapotranspirationskühlung um 25 % führt. Dadurch wird der durch den Klimawandel bedingte Verlust noch nicht vollständig ausgeglichen. Im Vergleich zum Ausgangswert des langjährigen Mittels ist noch immer ein Verlust von 5 % zu verzeichnen. Eine Entsiegelung von 30 P. p. hingegen führt zu einer weiteren Leistungssteigerung von 41 % gegenüber dem RCP 8.5-Szenario und ganzheitlichen Ausgleich der klimatischen Verluste. Die Kühlungsleistung der Bäume am Domplatz wird dabei um 6 % im Vergleich zum langjährigen Mittel gesteigert, was bedeutet, dass die aktuellen Werte durch eine Entsiegelung von 30 P. p. bereits übertroffen werden. Die höchsten Zuwächse der Evapotranspirationskühlung von 78 % werden bei einer Entsiegelung von 50 P. p. erreicht und liegen damit 34 % über dem des aktuellen Standes. Betrachtet man alle Bäume am Domplatz, so ist zu erkennen, dass die Leistungssteigerung für die Evapotranspirationskühlung und dem Biomassezuwachs insgesamt geringer ausfällt als für die Bäume mit einer hohen Versiegelung. Die klimatisch bedingten Ökosystemdienstleistungsverluste im Vergleich zum aktuellen Zustand werden jedoch mit 2 % ab einer Entsiegelung von 30 P. p. übertroffen.

Tab. 24 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20, 30 und 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Hochversiegelter Baumbestand (ab 60 %)								
		Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränderung (%)	
Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	91	16.809	93,7	2.746	2,15	32.949	+ 22	0
RCP 8.5	91	12.517	66,8	2.073	2,15	24.880	0	- 24
20	71	15.929	86	2.603	2,15	31.233	+ 25	- 5
30	61	17.857	99	2.923	2,15	35.081	+ 41	+ 6
50	41	22.413	125	3.687	2,14	44.244	+78	+ 34

Gesamter Baumbestand								
		Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränd. (%)	
Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	61	26.919	93,7	7.510	1,15	180.240	- 21,5	+ 0
RCP 8.5	61	24.572	66,82	6.179	1,21	148.310	+ 0	- 18
20	43	27.192	86,6	7.227	1,18	173.451	+ 17	- 4
30	34	27.612	99,6	7.679	1,16	184.304	+ 24	+ 2
50	21	27.612	125,5	8.201	1,14	196.834	+ 33	+ 9

Eine ähnliche Entwicklung zeigt sich beim Biomassezuwachs (s. Tab 25). Entsiegelungsmaßnahmen führen zu deutlichen Zuwächsen des Biomassezuwachses der stark versiegelten Bäume, welche die klimabedingten Rückgänge übersteigen. Bei einer Entsiegelung von 20 P. p. steigt die Biomasseproduktion um 20 % im Vergleich zu RCP 8.5 und um 8 % gegenüber dem langjährigen Mittel. Bei einer Entsiegelung von 30 P. p. liegen die Zuwächse bei 24 % im RCP 8.5-Szenario und 12 % im langjährigen Mittel. Die stärkste Wirkung ist bei einer Entsiegelung von 50 P. p. zu beobachten, die den Biomassezuwachs um 52 % gegenüber dem pessimistischen Klimaszenario und um 38 % gegenüber dem aktuellen Zustand erhöht.

Tab. 25 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Entsiegelungsmaßnahmen (20, 30 und 50 P. p.) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Hochversiegelter Baumbestand (ab 60 %)								
		Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)	
Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	91	15,7	0	2,6	2,27	31,3	+ 10	0
RCP 8.5	91	15,3	0,01	2,3	2,35	28,3	0	- 9
20	71	17	0	2,8	2,28	34	+ 20	+ 8
30	61	17	0	2,9	2,31	35	+ 24	+ 12
50	41	23	0	3,6	2,28	43	+ 52	+ 38

Gesamter Baumbestand								
		Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)	
Entsiegelung (P. p.)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	61	25,80	0,01	7,20	1,21	172,7	- 7,0	+ 0
RCP 8.5	61	25,79	0,01	6,69	1,25	160,6	+ 0	- 7
20	43	27,8	0,01	7,8	1,20	187,3	+ 17	+ 8
30	34	28,2	0,02	8,2	1,18	196,4	+ 23	+ 14
50	21	28,2	0,02	8,7	1,16	208,2	+ 30	+ 21

Potential von Bewässerungsmaßnahmen

Die Bewässerungsmaßnahmen werden ebenfalls hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Ökosystemdienstleistungen der stark versiegelten Bäume und dem gesamten Baumbestand am Domplatz betrachtet. Simuliert wurden eine Bewässerung von 80 l, 120l und 250l pro Baum und Woche.

Eine wöchentliche Zugabe von 80 Litern pro Baum kompensiert die Verluste im RCP 8.5-Szenario bereits um die Hälfte (12 %) (s. Tab. 26). Durch weitere Steigerungen der Bewässerungsmengen mit 125 und 250 Liter pro Baum und Woche werden die Verluste zunehmend reduziert. Bei der höchsten Bewässerungsmenge ist die durch die Bäume am Domplatz geleistete Evapotranspirationskühlung lediglich um 5,1 % geringer als der Ausgangswert im aktuellen Zustand. Im Vergleich zum Klimaszenario RCP 8.5 wird bereits ab einer wöchentlichen Zugabe von 80 Liter pro Baum eine Steigerung der Kühlleistung von 16 % erreicht. Bei einer Zugabe von 125 Liter steigt die Evapotranspirationskühlung um 19 % und bei einer Zugabe von 250 Liter um 26 %. Dennoch bleibt die Gesamtleistung der Evapotranspirationskühlung in allen Bewässe-

runingsszenarien weiterhin unter dem Ausgangswert des langjährigen Mittels. Betrachtet man die Effekte von Bewässerungsmaßnahmen auf alle Bäume am Domplatz, so sind dieselben Trends, jedoch leicht abgeschwächt zu erkennen.

Tab. 26 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125 und 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Hochversiegelter Baumbestand (ab 60 %)									
			Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränderung (%)	
Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	91	0	16.809	93,7	2.746	2,15	32.949	- 16	0
RCP 8.5	91	0	12.517	66,8	2.073	2,15	24.880	0	- 24
80	91	12.617	12.879	232	2.404	1,84	28.853	+ 16	- 12
125	91	19.714	13.084	233	2.462	1,82	29.551	+ 19	- 10
250	91	39.428	14.065	233	2.605	1,82	31.258	+ 26	- 5

Gesamter Baumbestand									
			Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränderung (%)	
Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	61	0	26.919	93,7	7.510	1,15	180.240	- 21,5	+ 0
RCP 8.5	61	0	24.572	66,82	6.179	1,21	148.310	+ 0	- 18
80	61	25.234	25.191	232,6	6.668	1,16	160.045	+ 7,9	- 11
125	61	39.428	25.539	232,6	6.879	1,14	165.096	+ 11,3	- 8
250	61	78.857	26.506	232,6	7.433	1,10	178.386	+ 20,3	- 1

Ein ähnlicher Trend zeigt sich beim Biomassezuwachs (s. Tab. 27). Bewässerung führt zwar zu moderaten Verbesserungen, mit Zunahmen zwischen 2,5 % und 4,6 %, doch reichen diese nicht aus, um das Niveau des langjährigen Mittels wieder zu erreichen. Die Biomassewerte bleiben selbst bei der höchsten Bewässerungsmenge von 250 l pro Baum und Woche deutlich unter den aktuellen Bedingungen (- 5,1 %). Hervorzuheben ist jedoch, dass bei der Maßnahmendurchführung für alle Bäume auf dem Domplatz eine deutlich höhere Leistungssteigerung im Vergleich zum RCP 8.5 erzielt wird. Im Vergleich zum langjährigen Mittel ähneln sich die Steigerungen denen der stark versiegelten Bäume.

Tab. 27) Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) im RCP 8.5-Szenario unter drei verschiedenen Bewässerungsmaßnahmen (80, 125 und 250 l/Baum/Woche) für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Hochversiegelter Baumbestand (ab 60 %)									
			Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)	
Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	91	0	15,7	0	2,6	2,3	31,3	+ 10	0
RCP 8.5	91	0	15,3	0	2,4	2,2	28,4	0	- 9,3
80	91	12.617	15,3	0	2,4	2,2	29,1	+ 2,5	- 7,0
125	91	19.714	15,3	0	2,5	2,2	29,4	+ 3,5	- 6,1
250	91	39.428	15,3	0	2,5	2,2	29,7	+ 4,6	- 5,1

Gesamter Baumbestand									
			Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)	
Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	61	0	25,80	0,01	7,20	1,21	172,7	- 7,0	+ 0
RCP 8.5	61	0	25,79	0,01	6,69	1,25	160,6	+ 0	- 7
80	61	25.234	26,35	0,05	6,97	1,24	167,2	+ 4	- 3
125	61	39.428	26,77	0,05	7,14	1,22	171,4	+ 7	- 1
250	61	78.857	28,13	0,05	7,60	1,19	182,5	+ 14	+ 6

Potential von kombinierten Maßnahmen

Es stellt sich nun die Frage, wie sich kombinierte Maßnahmen aus Entsiegelung und Bewässerung auf die Ökosystemdienstleistungen der Bäume am Domplatz auswirken würden. Dafür wurden jeweils zwei Simulationen, sowohl für die hochversiegelten Bäume, als auch für den Gesamtbestand durchgeführt. Es handelt sich dabei um eine Entsiegelung von 50 P. p. kombiniert mit einer Bewässerung von 80 Liter pro Baum und Woche, sowie eine Entsiegelung von 50 P. p. mit einer Bewässerung von 250 Liter pro Baum und Woche. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung beider Ökosystemdienstleistungen für Bäume ab einer Versiegelung von 60 %, sobald eine Entsiegelung von 50 P. p. mit zusätzlicher Bewässerung kombiniert wird (s. Tab. 28). Bei der kombinierten Maßnahme mit einer Bewässerung von 80 Liter, steigt die Kühlleistung auf 48.055 kWh an, ein Zuwachs von 46 % gegenüber dem langjährigen Mittel

und sogar eine beinahe Verdoppelung gegenüber RCP 8.5 von 93 %. Bei einer Bewässerungsmenge von 250 l pro Woche verstärkt sich dieser Effekt weiter. Die Summe erreicht 50.991 kWh, was einem Anstieg von 105 % im Vergleich zum klimatischen Zukunftsszenario entspricht. Die maximalen Kühlleistungen steigen unter beiden Bewässerungsvarianten, während die minimalen Werte stabil bleiben. Die Leistungssteigerung ist insgesamt für die stark versiegelten Bäume größer als für den gesamten Baumbestand welcher eine 57-prozentige Steigerung bei der Evapotranspirationskühlung und 29-prozentige Steigerung beim Biomassezuwachs erzielt.

Tab. 28 Evapotranspirationskühlung (kWh Sommer) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen mit jeweils Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränd. (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Hochversiegelter Baumbestand (ab 60 %)									
			Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränd. (%)	
Entsiegelung (P. p.) & Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	91	0	16.809	93,7	2.746	2,15	32.949	+ 24	0
RCP 8.5	91	0	12.517	66,8	2.073	2,16	24.880	0	- 24
50 % & 80l	41	12.617	23.030	232	4.004	2,01	48.055	+ 93	+ 46
50 % & 250l	41	39.428	24.341	232	4.249	2,01	50.991	+ 105	+ 55

Gesamter Baumbestand									
			Evapotranspirationskühlung (kWh)					Veränd (%)	
Entsiegelung (P. p.) & Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	61	0	26.919	93,7	7.510	1,15	180.240	-21,5	+ 0
RCP 8.5	61	0	24.572	66,8 2	6.179	1,21	148.310	+ 0	- 18
50 % & 80l	21	25.234	28.231	232,6	8.730	1,08	209.535	+ 41	+ 11
50 % & 250l	21	78.857	29.546	232,6	9.687	1,07	232.492	+ 57	+ 29

Die Entwicklung des Biomassezuwachses ist zwar durchweg positiv, jedoch geringer als für die Evapotranspirationskühlung (s. Tab 29). Bei einer Entsiegelung von 50 P. p. und einer zusätzlichen Bewässerung von 80 Liter pro Baum und Woche steigt die Biomasseproduktion auf 45,21 kg Tg/a. Das entspricht einem Anstieg von 60 % im Vergleich zum Klimaszenario und 44 % im Vergleich zum langjährigen Mittel. Bei 250 Liter pro Woche erhöht sich der Wert weiter auf 48,10 kg Tg/a, das entspricht einem Anstieg von 70 % im Vergleich zum Klimaszenario und 53 % im Vergleich zum langjähri-

gen Mittel. Auch hier steigen Maximal- und Mittelwerte deutlich an, während die minimalen Werte unverändert bleiben. Beim Biomassezuwachs sind die Zuwächse des gesamten Baumbestandes mit maximal 50 % im Vergleich zum RCP 8.5-Szenario und 39 % im Vergleich zum aktuellen Zustand deutlich geringer als bei den stark versiegelten Bäumen.

Tab. 29 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/Jahr) im RCP 8.5-Szenario unter zwei kombinierten Maßnahmen mit jeweils Entsiegelung um 50 P. p. und Bewässerung von 80 und 250 l/Baum/Woche für Bäume mit einer Versiegelung ab 60 % am Domplatz (oben) und dem Gesamtbestand (unten) (\bar{x} = Mittelwert; VK = Variationskoeffizient; Σ = Summe; Veränderung (%) = prozentuale Veränderung im Vergleich zum LM = langjährigen Mittel und RCP 8.5 Ausgangsszenario)

Hochversiegelter Baumbestand (ab 60 %)									
			Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)	
Entsiegelung (P. p.) & Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	91	0	15,7	0	2,6	2,3	31,3	+ 11	0
RCP 8.5	91	0	15,3	0,01	2,3	2,3	28,3	0	- 10
50 % & 80l	41	12.617	23,7	0,06	3,7	2,2	45,21	+ 60	+ 44
50 % & 250l	41	39.428	25,1	0,06	4,0	2,2	48,10	+ 70	+ 53

Gesamter Baumbestand									
			Biomassezuwachs kg Tg/Baum/a					Veränderung (%)	
Entsiegelung (P. p.) & Bewässerung (l/Woche/Baum)	Mittlere Versiegelung \bar{x} (%)	Σ (l/a)	Max.	Min.	\bar{x}	VK	Σ	RCP 8.5	L.M.
L.M.	61	0	25,80	0,01	7,20	1,21	172,7	- 7,0	+ 0
RCP 8.5	61	0	25,79	0,01	6,69	1,25	160,6	+ 0	- 7
50 % & 80l	21	25.234	28,8	0,06	9,1	1,12	218,6	+ 36	+ 26
50 % & 250l	21	78.857	30,0	0,06	10,0	1,11	240,4	+ 50	+ 39

4 Diskussion

Die zu Beginn definierten Forschungsfragen werden nun durch die Simulationsergebnisse beantwortet.

4.1 Charakterisierung des Baumbestandes

Der Baumbestand der Stadt Speyer wird hinsichtlich der Durchmesserverteilung betrachtet und nach Morgenroth et al. 2020 einem der drei Typen (s. Abb. 20) zugeordnet. Typ I ist die junge Population, welche eine hohe Anzahl an Bäumen in den niedrigsten Durchmesserklassen aufweist. Das prozentuale Vorkommen in den jeweiligen Klassen nimmt mit zunehmenden Stammdurchmesser exponentiell ab. Unter Typ II, der reifenden Population, ist eine Stammdurchmesserverteilung zu verstehen, welche einen geringeren Anteil Bäume in den niedrigsten Durchmesserklassen hat und sein Maximum in den kleineren Stammdurchmesserklassen aufweist. Auch bei dieser Verteilung nehmen die Anteile mit zunehmender Durchmesserklasse ab. Typ III, die reife Population beschreibt einen Baumbestand, welcher eine Gleichverteilung aller Durchmesserklassen aufweist.

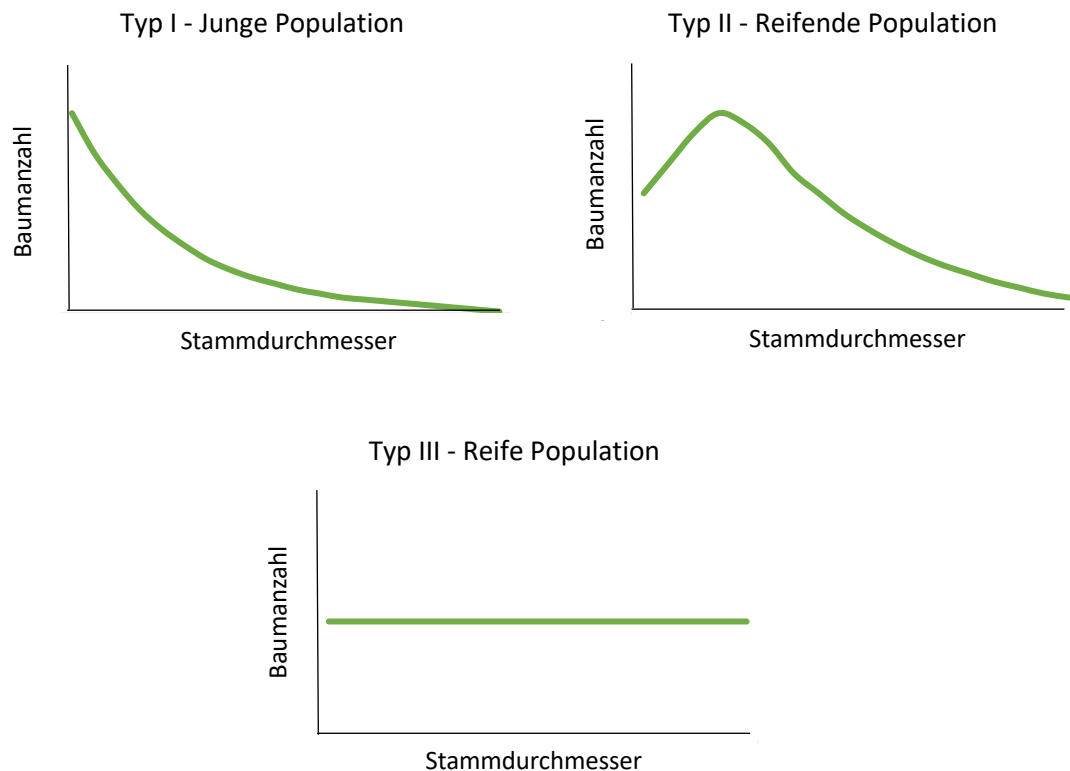


Abb. 20 Typen von Stammdurchmesserverteilung in Städten (Grafik selbst erstellt, basierend auf Morgenroth et al. 2020)

Die Durchmesser­verteilung der 9.232 Bäume des Katasters in Speyer ist dem Typ I – Junge Population zuzuordnen. Der größte Anteil Bäume befindet sich in der Durchmesser­klasse 10, was darauf hindeutet, dass innerhalb der letzten Jahre neue Bäume gepflanzt wurden. Der Anteil sinkt daraufhin mit zunehmender Baumdurchmesser­klasse, mit Ausnahme eines Zwischenmaximums in Klasse 40 mit 25 %, sowie der leicht erhöhten Werte in Klasse 100 mit 3,7 %. Die Stammdurchmesser­verteilung lässt sich durch ein exponentielles Regressionsmodell erklären. Das bestätigt das hohe Bestimmtheitsmaß mit 0,91. Allgemein deutet die hohe Anzahl Bäume mit einem geringen Stammdurchmesser darauf hin, dass ein maßgeblicher Anteil der potentiellen Ökosystemdienstleistungen erst zukünftig zur Verfügung stehen wird (Moser et al. 2015). Zudem sind diese Bäume häufig von einer mittleren (40 – 59 %) bis hohen Versiegelung (ab 60 %) betroffen, was sie sowohl in Wachstum als auch in der Bereitstellung der Ökosystemdienstleistungen potentiell einschränkt (Rahman et al. 2019). Bäume mit einem großen Stammdurchmesser von 60 bis ≥ 100 cm sind anteilig geringer vertreten (20 %). Auffällig ist, dass diese Bäume größtenteils auf Grünflächen und entlang, beziehungsweise in der Nähe von Wasserläufen zu finden sind und somit weniger stark von Versiegelung betroffen sind. Bäume mit einem niedrigen Stammdurchmesser kommen oft als Straßenbegleitgrün insbesondere in Siedlungen vor und besitzen durchschnittlich höhere Versiegelungswerte.

Bei der Betrachtung der Durchmesser­verteilung stellt sich zudem die Frage nach der idealen Verteilung, um die Stadtbäume langfristig gesund und vielfältig zu erhalten. Es gibt aktuell zwei Modelle, die eine ideale Verteilung anstreben. Das Richards' Modell beschreibt eine lineare Abnahme der prozentualen Baumvorkommen in den jeweiligen Durchmesser­klassen und hat einen starken Fokus auf jüngere Bäume, während das Millward und Sabir Modell ebenfalls schwerpunktmäßig auf junge Bäume setzt, älteren Bäumen jedoch ebenfalls ein Gewicht gibt (25 % zwischen 60 und 90 cm, 5 % über 90 cm) (Morgenroth et al. 2020). Wie die ideale Durchmesser­klassen­verteilung für die Stadt Speyer aussieht, ist ein Thema welches als zusätzliche Forschung bearbeitet werden könnte. Allgemein ist jedoch positiv hervorzuheben, dass etwa 40 % der Bäume der niedrigsten Durchmesser­klasse angehörig sind und somit als Ersatz für alte und sterbende Bäume dienen können.

Bezüglich der Toleranz gegenüber Trockenheit ist hervorzuheben, dass mehr als drei Viertel der Bäume eine mittlere Trockenheitstoleranz besitzen, während lediglich 18 % der hohen Toleranzklasse zuzuordnen sind. Besonders trockenheitsempfindliche Individuen sind am wenigsten in Speyer vertreten. Sie kommen oft in gewässergeprägten- oder parknahen Standorten vor, was auf gute Standortbedingungen mit einer geringen Versiegelung hindeutet. An diesen Standorten ist trotz einer niedrigen Toleranz gegenüber Trockenheit zukünftig mit einer gesunden Entwicklung der Bäume auch bei Hitzestress zu rechnen (vgl. Pattnaik et al. 2024). Die Vitalität der Bäume kann jedoch nicht im CityTree Model simuliert werden. Es ist deshalb möglich, dass die Individuen mit einer geringen Hitzeverträglichkeit zukünftig unabhängig von den Standortvorteilen vermehrt durch Maßnahmen unterstützt werden müssen (z. B. Bewässe-

rung). Insgesamt ist bei der zukünftigen Artenauswahl auf resiliente und dienstleistungsstarke Baumarten zu setzen (Rötzer et al. 2020). Dabei ist eine hohe Diversität von Vorteil, da der Bestand somit weniger anfällig für Krankheiten ist (Aronson et al. 2014).

Der Baumbestand am Domplatz, bestehend aus 24 für die Simulation verwendeten Individuen unterscheidet sich hinsichtlich der stadtweiten Werte. Unter den Bäumen sind lediglich die niedrigen Stammdurchmesserklassen vertreten, von einem 3 cm bis 48 cm Durchmesser. Es sind keine Bäume der höheren Stammdurchmesserklassen vertreten. Hinsichtlich der Trockenheitstoleranz zeigt sich eine deutliche Tendenz. Über die Hälfte der Bäume (62,5 %) verfügen über eine mittlere Trockenheitstoleranz, während die übrigen 37,5 % einer hohen Trockenheitstoleranz zugeordnet sind. Der Baumbestand am Domplatz besteht somit aus relativ robuste Arten. Die hohe Versiegelung bei einem Großteil der Bäume, kombiniert mit niedrigen SVF-Werten, deutet auf herausfordernde Wachstumsbedingungen am Domplatz hin. Gleichzeitig besitzen drei Bäume unterschiedlicher Arten eine ideale Versiegelung von 0 %. Diese Heterogenität wirkt sich voraussichtlich auch auf die Ökosystemdienstleistungen aus, welche die Bäume am Domplatz unter verschiedenen Klimaszenarien bereitstellen.

4.2 Wachstum und Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen Bedingungen und Klimaszenarien

69

Die Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume unter aktuellen Klimabedingungen (Simulation des langjährigen Mittels) sind heterogen verteilt. Insgesamt wird für die Evapotranspirationskühlung der simulierten Bäume stadtweit eine Kühlungsenergie von 71,4 GWh erreicht. Der gesamte Biomassezuwachs summiert sich im langjährigen Mittel auf 65,1 kt, wobei etwa die Hälfte davon fixiertem Kohlenstoff entspricht.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass Bäume mit einer mittleren Trockenheitstoleranz im langjährigen Mittel die höchsten durchschnittlichen Kühlleistungen erbringen, während Bäume mit einer hohen Toleranz das größte durchschnittliche Wachstum zu verzeichnen haben. Bäume mit einer niedrigen Toleranz gegenüber Trockenheit erbringen bereits unter aktuellen Bedingungen deutlich geringere Ökosystemdienstleistungen als die Bäume der anderen beiden Kategorien. Die Ökosystemdienstleistungen variieren somit je nach Baumart und deren Eigenschaften (Rötzer et al. 2021). Unterschiedliche Standortverhältnisse kreieren zudem Räume, welche für unterschiedliche Baumarten geeignet sind (GALK 2018).

Werden die aktuellen Ökosystemdienstleistungen differenziert nach Baumarten aus dem CityTree Model betrachtet, zeigt sich, dass einige Arten sowohl in der Kühlleistung als auch im Biomassezuwachs besonders leistungsfähig sind. Zu den Multitalenten gehören *Tilia cordata*, *Platanus x acerifolia* und *Fraxinus excelsior*, welche positiv durch eine hohe mittlere Kühlleistung und einen überdurchschnittlichen Biomassezuwachs auffallen. Arten wie *Betula pendula* oder *Aesculus hippocastanum* hingegen,

erreichen bei beiden Ökosystemdienstleistungen nur geringe durchschnittliche Werte. Insgesamt weisen alle Arten hohe Variationskoeffizienten auf, was vermuten lässt, dass die Leistungsfähigkeit der Bäume stark von den vorherrschenden Standortfaktoren beeinflusst wird.

Daraufhin werden das Wachstum und die Ökosystemdienstleistungen unter verschiedenen Zukunftsszenarien näher betrachtet. Die Evapotranspirationskühlung nimmt im Vergleich zum langjährigen Mittel in den zukünftigen Klimaszenarien und dem Trockenjahr durchweg ab (vgl. Rötzer et al. 2024). Für den Biomassezuwachs ist ebenfalls ein Rückgang über die Klimaszenarien hinweg zu beobachten (vgl. ebd.). Besonders hervorzuheben ist, dass sowohl die Transpirationskühlung als auch der Biomassezuwachs im pessimistischen Klimaszenario (RCP 8.5) höhere Werte aufweisen als im moderaten Szenario (RCP 2.6). Diese Entwicklung lässt sich durch baumphysiologische und klimatische Prozesse erklären. Zunächst führen die deutlich höheren durchschnittlichen Temperaturen im RCP 8.5-Szenario (Jahresdurchschnitt + 3,8° C höher als im RCP 2.6) zu einem verlängerten Vegetationszeitraum (George et al. 2007; Rötzer et al. 2000). Durch die phänologische Veränderung, welche die Verschiebung der jahreszeitlichen Entwicklung der Pflanzen auf Grund des Klimawandels beschreibt, kommt es zu einem früheren Austrieb, Blüte und Fruchtbildung im Vergleich zu vorangegangenen Jahren (ebd.). Der frühere Austrieb, der auch im CityTree Model durch die Verschiebung der Niederschlags- und Temperaturmuster zur Geltung kommt, erweitert den Verdunstungs- und Photosynthesezeitraum der Bäume (Rötzer et al. 2024). Da die Niederschläge zwischen den Klimaszenarien lediglich geringe Veränderungen aufweisen, steigt vor allem die Potentielle Evapotranspiration (PET) durch erhöhte durchschnittliche Temperaturen. Dadurch können Bäume, wenn ihnen genug Wasser zur Verfügung steht, höhere Verdunstungsraten und damit höhere Kühlleistungen erzielen. Parallel dazu führt die hohe atmosphärische CO₂-Konzentration (bis zu einem gewissen Punkt) im Szenario RCP 8.5 zu einer erhöhten Photosyntheseleistung, welche bei einigen Arten zu einem geringeren Rückgang des Biomassezuwachses führt. Dadurch können Bäume in Speyer unter dem RCP 8.5-Szenario trotz höheren Trockenstresses Biomasse bilden, sofern die Wasserverfügbarkeit diese nicht limitiert. Wie in vielen Städten, ist jedoch auch in Speyer eine reduzierte Biomasseproduktion im Vergleich zu aktuellen Klimabedingungen zu beobachten, welche auf eine Reduktion der Photosyntheseleistung durch Feinstaub, oder Wachstumsreduzierung auf Grund von Trockenstress zurückzuführen ist (Moser et al. 2017).

Die Frage nach der am stärksten durch die klimatischen Veränderungen beeinflusste Ökosystemdienstleistung wird ebenfalls beantwortet. Die Ökosystemdienstleistung Evapotranspirationskühlung ist im Szenario des Trockenjahres am stärksten beeinträchtigt (- 55 % im Vergleich zum langjährigen Mittel). Die Rückgänge in den RCP-Szenarien sind ebenfalls stärker als beim Biomassezuwachs. Die Kühlungsleistung ist somit unter anhaltenden extremen Temperaturen und geringen Niederschlägen am stärksten betroffen.

Nachdem die stadtweiten Dienstleistungen betrachtet wurden, wird nach Trockenheitstoleranzklassen differenziert. Die Werte der Evapotranspirationskühlung nehmen für alle Trockenheitstoleranzklassen in allen Klimaszenarien (Trockenjahr, RCP 2.6, RCP 8.5) im Vergleich zum langjährigen Mittel ab. Die höchsten Rückgänge sind bei den Bäumen mit einer niedrigen Trockenheitstoleranz zu verzeichnen, was darauf hinweist, dass diese Arten am stärksten durch die zunehmenden Temperaturen und Wasserknappheit in Städten leiden. Die geringsten Rückgänge sind bei den Bäumen mit einer hohen Trockenheitstoleranz zu erkennen. Auffällig ist jedoch, dass diese Baumarten die niedrigsten Mittelwerte der Evapotranspirationskühlung über alle Szenarien und Toleranzklassen hinweg aufweisen und deren Werte nur geringe Veränderungen zeigen. Somit haben trockenheitstolerante Arten eine durchschnittlich geringe, dafür jedoch konstante Verdunstungsleistung über alle Szenarien hinweg. Das könnte daran liegen, dass diese Bäume ein effizienteres Wassermanagement haben und bei extremen Trockenstress ihre Stomata schließen, wodurch weniger Wasser transpiriert wird (Rahman et al. 2019). Somit erbringen sie stabile Leistungen unter Trockenstress und können langfristig eine zuverlässigere, wenn auch schwächere Kühlleistung im urbanen Klima in Speyer bereitstellen (vgl. GALK 2018, Rötzer et al. 2021). Die höchsten Maximalwerte für den Biomassezuwachs und die Kohlenstoffspeicherung, sowie die höchsten Mittelwerte über alle Szenarien (mit Ausnahme des RCP 2.6-Szenarios) hinweg treten bei trockenheitstoleranten Arten auf. Diese Bäume können das vorhandene Wasser auch unter Trockenstress effizient für die Produktion von Biomasse nutzen und somit unter verschiedenen Klimabedingungen wachsen. Ein ähnliches, wenn auch abgeschwächtes Muster zeigt sich bei Baumarten mit einer mittleren Trockenheitstoleranz, deren Maximalwerte insgesamt mit Ausnahme des RCP 2.6-Szenarios etwas niedriger liegen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Fähigkeit zur Minimierung des Verlustes an Baumwachstum und Kohlenstoffspeicherung entscheidend von der Trockenheitstoleranz der Baumart abhängt. Die klimatischen Veränderungen und Trockenjahre stellen jedoch eine Herausforderung für alle Toleranzklassen dar.

Es können außerdem baumartenspezifische Unterschiede festgestellt werden. Es gibt Baumarten, die geringe Leistungsverluste unter Extrembedingungen zeigen. Darunter ist insbesondere *Robina pseudoacacia* in der Stadt Speyer als Baumart mit starker Trockenheitstoleranz hervorzuheben, welche geringe Leistungsverluste unter Extrembedingungen erfährt und von der Leistungsfähigkeit unter klimatischen Veränderungen am stabilsten bleibt. Zudem ist die Baumart *Platanus x acerifolia* zu nennen, welche eine hohe durchschnittliche Kühlung in Speyer erzielt und unter den Szenarien nur geringe Verluste zeigt. Außerdem zeichnet sich die Baumart *Fraxinus excelsior* durch einen relativ hohen mittleren Biomassezuwachs aus, der über die Szenarien hinweg stabil bleibt. Diese Trends entsprechen den Forschungsergebnissen von Rötzer et al. 2024. Der Biomassezuwachs von Arten wie *Tilia cordata* ($R^2 = 0,43$) und *Betula pendula* ($R^2 = 0,41$) werden stark von der Niederschlagsmenge beeinflusst, während *Robina pseudoacacia* ($R^2 = 0,08$) unter abnehmender Niederschlagsmenge weiterhin stabile Leistungen erbringt (ebd.).

4.3 Klimaanpassung durch Stadtbäume

Maßnahmen werden für die Bäume mit einer hohen Versiegelung ab 60 % durchgeführt. Einem Großteil dieser Bäume ist die niedrige Trockenheitstoleranzklasse zuzuordnen, was verglichen mit dem Gesamtbestand als ungünstige Ausgangsbedingung zu bewerten ist. Ein hoher Anteil der Bäume mit einer hohen Versiegelung befinden sich sowohl im Norden, als auch im Süden des Stadtgebietes in Einfamilienhauswohnsiedlungen und in größeren Wohnkomplexen entlang von Straßen. Für diese Bereiche ist es wichtig Anpassungsmöglichkeiten zu testen, da diese hochversiegelten Bereiche erhebliche gesundheitliche Belastungen für die Bevölkerung in Form von Hitzestress mit sich bringt (Madrigano et al. 2015; DWD 2025b). Insbesondere in Wohngebieten, welche Rückzugsräumen für die Bewohner*innen darstellen, sollte ein geeignetes Mikroklima gewährleistet sein, um die Aufenthaltsqualität zu sichern und hitzebedingte und gesundheitliche Risiken zu minimieren (ebd.).

4.3.1 Entsiegelungsmaßnahmen

Betrachtet man die Auswirkungen von Entsiegelungsmaßnahmen auf die Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen Klimabedingungen, so verbessern sich die Werte der Evapotranspirationskühlung als auch die des Biomassezuwachses und somit auch die Kohlenstoffspeicherung der stark versiegelten Bäume in Speyer mit abnehmender Bodenversiegelung. Diese Verbesserung der betrachteten Ökosystemdienstleistungen ist deutlich und stimmen mit den Ergebnissen weiterer Forschungsarbeiten überein (Nayanesh et al. 2024; Rötzer et al. 2021; Moser et al. 2018). Eine Entsiegelung um 50 P. p. führt in Speyer zu einer mehr als Verdopplung der Ökosystemdienstleistungen, wobei die Evapotranspirationskühlung durchgehend höhere Verbesserungen erzielt. Somit kann festgestellt werden, dass Entsiegelung ein hochwirksames Instrument zur Optimierung der Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen Klimabedingungen darstellt.

Der Rückgang der Ökosystemdienstleistungen im Klimaszenario RCP 8.5 im Vergleich zum langjährigen Mittel unterstreicht, dass Anpassungsmaßnahmen unter zukünftigen Klimabedingungen getestet werden sollten. Bei der Simulation von Entsiegelungsmaßnahmen unter dem RCP 8.5-Szenario zeigt sich, dass die relative Wirksamkeit stärker ausgeprägt ist als im langjährigen Mittel. Während die Zuwächse unter moderaten Entsiegelungsgraden in beiden Szenarien ähnlich sind, erzielt eine Entsiegelung um 50 P. p. im RCP 8.5-Szenario eine besonders hohe Wirkung. Das lässt sich darauf zurückführen, dass unter diesem Klimaszenario die Wasserverfügbarkeit ein besonders limitierender Faktor ist und die Entsiegelung diese Limitation wirksam verbessert (vgl. Rötzer et al. 2021). Im Vergleich zum langjährigen Mittel hat die Entsiegelung einen unmittelbar positiven Einfluss auf den Biomassezuwachs im RCP 8.5-Szenario, welcher sich bereits ab einer Entsiegelung von 20 P. p. zeigt. Zuwächse der Evapotranspirationskühlung im RCP 8.5-Szenario übersteigen ab einer Entsiegelung von 30 P. p. die Dienstleistung unter aktuellen Klimabedingungen. Die Simulationen

zeigen, dass Entsiegelung eine effektive und wirksame Mitigationsmaßnahme ist, um die zukünftig klimatisch bedingten Defizite der Ökosystemdienstleistungen Evapotranspirationskühlung und des Biomassezuwachses/Kohlenstoffspeicherung auszugleichen und die Leistungen darüber hinaus zu steigern.

Auch bei Betrachtung der Gesamteffekte ist eine durchgehende Besserung der Ökosystemdienstleistungen erkennbar. Für diese Simulationen wird das Abflussverhalten genauer analysiert. Durch Entsiegelungsmaßnahmen wird Wurzelraum erschlossen und ermöglicht, dass mehr Niederschlagswasser versickern, gespeichert und von Bäumen genutzt werden kann (Rötzer et al. 2021; Rahman et al 2019). Der Abfluss nimmt dementsprechend bei Bäumen, für die Entsiegelungsmaßnahmen simuliert werden, ab. Dadurch werden Kanalisationen insbesondere bei Starkregenereignissen entlastet (DWA 2005). Die größte Reduktion wird bei einer Entsiegelung um 50 P. p. mit 2,5 % erreicht.

Im RCP 8.5-Szenario ist ein Rückgang des Abflusses zu beobachten, der stärker ausfällt als der Rückgang im langjährigen Mittel. Dieser deutliche Unterschied lässt sich jedoch nicht durch die jährliche Gesamtniederschlagsmenge erklären, da diese im RCP-8.5-Szenario mit 593 mm nur geringfügig unter dem Wert des langjährigen Mittels von 598 mm liegt. Ein möglicher Grund ist die veränderte saisonale Niederschlagsverteilung. Im RCP 8.5-Szenario treten in den Sommermonaten Juni bis August deutlich geringere und ungleich verteilte Niederschläge auf (ZSK 2024, PIK 2017). Diese saisonale Verteilung führt zu längeren Trockenphasen und damit zu einer stärkeren Reduktion des Abflusses, obwohl die jährliche Niederschlagsmenge nahezu gleichbleibt. Entsiegelungsmaßnahmen können somit auch bezüglich des Abflussverhaltens als positiv bewertet werden, da sie den Wurzelraum erhöhen und dadurch mehr Wasser für die Bäume verfügbar machen (Rötzer et al. 2021; Rahman et al 2019).

Zuletzt werden die Effekte von Entsiegelungsmaßnahmen am Domplatz betrachtet. Die Daten zeigen, dass Entsiegelungsmaßnahmen nicht nur im stadtweiten Kontext, sondern auch bei der Betrachtung eines stark versiegelten Platzes in Speyer eine ausgesprochen wirksame Anpassungsstrategie an den Klimawandel darstellen. Sie ermöglichen es nicht nur, die durch RCP 8.5 verursachten Rückgänge der Ökosystemdienstleistungen vollständig zu kompensieren, sondern führen darüber hinaus ab einer Entsiegelung von 30 P. p. zu weiteren Leistungssteigerungen im Vergleich zum aktuellen Zustand. Hervorzuheben ist jedoch, dass bei der Maßnahmendurchführung für alle Bäume am Domplatz eine deutlich höhere Leistungssteigerung des Biomassezuwachses im Vergleich zum RCP 8.5 und der Leistungssteigerung der stark versiegelten Bäume erzielt wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Entsiegelungsmaßnahmen unter aktuellen, sowie zukünftigen Klimabedingungen deutliche Verbesserungen der Ökosystemdienstleistungen erzielen. Die Simulationen bestätigen, dass Entsiegelung eine wirksame Mitigationsmaßnahme ist, welche die zukünftig klimatisch bedingten Defizite der Evapotranspirationskühlung und des Biomassezuwachses bzw. der Kohlenstoffspeicherung der simulierten Bäume in Speyer ausgleicht und die Ausgangswerte

des aktuellen Zustandes sogar übertrifft. Es handelt es sich um eine einmalige Maßnahme, welche langfristige Standortverbesserungen ermöglicht. Der Einsatz an Ressourcen, monetär und personell, ist einmalig hoch, weshalb Entsiegelung als ein hochwirksames Instrument zur Stärkung der Klimaresilienz und Sicherung der Leistungsfähigkeit von Baumbeständen beschrieben werden kann (vgl. Nayanesh et al. 2024).

4.3.2 Bewässerungsmaßnahmen

Als nächstes werden die Effekte von Bewässerungsmaßnahmen auf die Ökosystemdienstleistungen Evapotranspirationskühlung als auch die des Biomassezuwachses und somit auch die Kohlenstoffspeicherung der stark versiegelten Bäume in Speyer analysiert. Unter aktuellen Klimabedingungen betrachtet ist die höchste Steigerung der Evapotranspirationskühlung von + 75 % bei einer Bewässerung von 250 l pro Baum und Woche zu beobachten (vgl. Daniel et al. 2018; Gao et al. 2020). Nennenswert ist, dass die Hälfte der Bewässerungsmenge zu einer verhältnismäßig höheren Steigerung der Kühlungsleistung von 53,5 % führt. Die unterschiedlichen Wirkungsgrade der Bewässerungsmengen lassen sich möglicherweise durch die von der Wassersättigung abhängigen Wirkungsleistung der Bäume erklären. Sind die Bäume ideal mit Wasser versorgt, besteht ein größeres Verdunstungspotential (vgl. Haupt et al. 2025). Eine um 56 % geringere Bewässerungsmenge von 80 l pro Woche und Baum führt zu einer vergleichsweise geringen zusätzlichen Kühlungsleistung von 41,9 %. Auch beim Biomassezuwachs ist der höchste Anstieg bei einer Bewässerung von 250 l pro Baum und Woche zu verzeichnen. Die Hälfte der Bewässerungsmenge führt auch bei dieser Ökosystemdienstleistung zu einem verhältnismäßig höheren Zuwachs. Die geringsten Vorteile werden bei einer Bewässerung von 80 l pro Baum und Woche mit einem Zuwachs von 24,2 % erzielt.

Daraufhin werden die Bewässerungseffekte unter dem pessimistischen Klimaszenario analysiert. Während im unbewässerten RCP 8.5-Szenario die Summe der Kühlleistung um 23 % im Vergleich zum langjährigen Mittel sinkt, führt eine Bewässerung von 250 l pro Woche zu einer mehr als Verdoppelung der Kühlleistung (+115 % im Vergleich zu RCP 8.5). Dieselbe Bewässerungsvariante erhöht die Biomasseproduktion um 60 % gegenüber dem unbewässerten RCP 8.5-Szenario. Damit wird deutlich, dass Bewässerungsmaßnahmen hochversiegelter Bäume in Speyer auch das Wachstumspotenzial der Bäume erheblich verbessern und den negativen Einfluss des Klimawandels vollständig kompensieren.

Betrachtet man die Gesamteffekte der Bewässerungsmaßnahmen, so wird die gesamte Evapotranspirationskühlung gesteigert. Dieser Effekt ist im Klimawandelszenario trotz niedrigerer Ausgangswerte stärker als im langjährigen Mittel. Die höhere relative Wirksamkeit unter dem Szenario RCP 8.5 lässt sich darauf zurückführen, dass die Bäume unter wärmeren und trockeneren Sommern stärker unter Trockenstress leiden, und somit vermehrt auf zusätzliche Wassergabe reagieren (vgl. Daniel et al. 2018; Gao et al. 2020).

Zudem wird der Einfluss von Bewässerungsmaßnahmen auf das Abflussverhalten analysiert. Auffallend ist, dass die relative Abflussentwicklung für beide Szenarien gleich ausfällt, wobei das pessimistische Klimaszenario deutlich niedrigere absolute Werte aufweist. Insgesamt ist ein deutlicher Anstieg des Abflusses von bis zu 4,3 % bei 250 l pro Woche und Baum im Vergleich zu keiner Bewässerung festzustellen. Das liegt daran, dass die Wasserzufuhr erhöht, der Versickerungsraum aber gleichbleibend groß ist. Sobald der Boden gesättigt ist, kommt es im Modell zum Abfluss in tiefere Bodenschichten (Rötzer et al. 2019).

Daraufhin werden die Bewässerungsmaßnahmen am Domplatz betrachtet. Die Gesamtleistung der Evapotranspirationskühlung bleibt in allen Szenarien weiterhin unter dem Ausgangswert des langjährigen Mittels, was darauf hinweist, dass die strukturellen Limitationen am Domplatz, wie die hohe durchschnittliche Versiegelung, durch Bewässerung als alleinige Maßnahme nicht überwunden werden können. Betrachtet man die Effekte von Bewässerungsmaßnahmen auf alle Bäume am Domplatz, so sind dieselben Trends, in abgeschwächter Form zu erkennen.

Mit den Simulationen wird deutlich, dass Bewässerungsmaßnahmen das Wachstumspotenzial und die Kühlleistung hochversiegelter Bäume in Speyer erheblich verbessern und den negativen Einfluss des Klimawandels kompensieren. Insbesondere die Evapotranspirationskühlung kann dadurch maßgeblich gesteigert werden. Abgesehen von den durchweg positiven Auswirkungen der Bewässerung ist sie als alleinige Maßnahme jedoch eher kritisch zu beurteilen. Es handelt sich um eine kurzfristige Maßnahme, welche keine langfristigen Vorteile für die Bäume generiert (Prodanovic et al. 2022). Zudem entstehen hohe Personal- und Materialkosten durch die benötigte Wassermenge und deren Verteilung an die einzelnen Bäume. Bewässerungsmaßnahmen sollten unter Monitoring des Bodenwassergehaltes durchgeführt werden, da somit die Ressourcenverschwendung minimiert werden kann (ebd.). Es ist sinnvoll zunächst die Standortbedingungen der Bäume nachhaltig durch Entsiegelungsmaßnahmen zu verbessern. Die Wirksamkeit einer Kombination aus Entsiegelung und Bewässerung wird als Option für die Sicherung der Baumgesundheit für extreme Bedingungen geprüft.

4.3.3 Kombinierte Maßnahmen

Die Einflüsse einer Kombination aus Entsiegelung von 50 P. p. und einer Bewässerung von 80 und 250 Liter pro Baum und Woche auf die Ökosystemdienstleistungen Evapotranspirationskühlung und Biomassezuwachs/Kohlenstoffspeicherung der stark versiegelten Bäume wird nachfolgend analysiert. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung beider Ökosystemdienstleistungen, sobald eine Entsiegelung um 50 P. p. mit zusätzlicher Bewässerung kombiniert wird. Unter einer Bewässerung von 80 Liter, steigt die Kühlleistung um beinahe das Doppelte im Vergleich zum RCP 8.5-Szenario (93 %) an. Bei einer Bewässerungsmenge von 250 Liter pro Woche verstärkt sich dieser Effekt weiter (105 %). Die Entwicklung des Biomassezuwachses ist zwar durchweg positiv, jedoch mit maximal 70 % Steigerung unter einer Bewässerung von 250 l

pro Baum und Woche deutlich geringer als bei der Evapotranspirationskühlung. Das deutet darauf hin, dass die Bäume mit einer niedrigeren Bewässerung bereits ihr Wachstumspotential voll ausgeschöpft haben. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Simulationen, dass die Rückgänge der Ökosystemdienstleistungen im Klimaszenario RCP 8.5 nicht nur eingeschränkt, sondern vollständig kompensiert werden können. Vergleicht man die summierten relativen Zuwächse der einzelnen Maßnahmen mit den Zuwächsen der Kombinationsmaßnahmen, so ist ersichtlich, dass die Steigerungen nicht den summierten Einzelmaßnahmen entsprechen. Während bei der Evapotranspirationskühlung die Summe der Einzelmaßnahmen mit 129 % bei 50 P. p. Entsiegelung und 80 l Bewässerung, sowie 186 % bei 50 P. p. Entsiegelung und 250 l Bewässerung höher ausfällt als die kombinierten Maßnahmen (116 % bzw. 178 %), zeigt sich beim Biomassezuwachs ein gegenteiliger Trend. Dort übersteigt die kombinierte Maßnahme mit 93 % Zuwachs bei 80 Liter und 147 % Zuwachs bei 250 Liter die Summe der Einzeleffekte von 84 % bzw. 121 % deutlich. Dieser Synergieeffekt lässt sich eventuell dadurch erklären, dass Entsiegelung die Standortbedingungen langfristig verbessert, wodurch Bewässerungswasser effektiver gespeichert und von den Bäumen genutzt werden kann. Zudem könnte ein durch kombinierte Maßnahmen potentiell vollständig ausgeglichener Trockenstress den höheren Wachstum der Bäume im kombinierten Szenario erklären. Die höheren Steigerungen der Evapotranspirationskühlung bei Betrachtung der Einzelmaßnahmen im Vergleich zu den kombinierten Szenarios lässt vermuten, dass ab einem gewissen Punkt die einflussnehmenden Faktoren die Bereitstellung der Ökosystemdienstleistung limitieren und somit keine zusätzlichen Steigerungen in der Kühlungsleistung hervorgerufen werden können (Liang and Huang 2023). Der Biomassezuwachs ist somit als Dienstleistung zu nennen, welche besonders durch die Maßnahmenkombination profitiert. Die kombinierten Maßnahmen wirken als effektive Kompensation für zukünftige Klimabedingungen.

Die Ergebnisse der Kombinationsmaßnahmen für stark versiegelte Bäume am Domplatz zeigen eine deutliche Verbesserung beider Ökosystemdienstleistungen. Die höchste Steigerung der Kühlungsleistung kann bei einer Entsiegelung um 50 P. p. und einer Bewässerung von 250 l/Baum/Woche mit 105 % im Vergleich zum RCP 8.5-Szenario beobachtet werden. Die Leistungssteigerung ist insgesamt für die stark versiegelten Bäume größer als für den gesamten Baumbestand. Das ist darauf zurückzuführen, dass weniger Leistungspotential für Bäume bereitgestellt werden kann, die bereits einen niedrigen Versiegelungsgrad besitzen. Die relativen Zuwächse für die stark versiegelten Bäume am Domplatz sind zudem etwas geringer im Vergleich zu den stadtweiten Leistungssteigerungen. Hinsichtlich des Biomassezuwachses ist festzustellen, dass die Entwicklung durch Kombinationsmaßnahmen durchweg positiv, jedoch mit einer Steigerung von maximal 60 % deutlich geringer im Vergleich zu den Kühlungsleistungen ausfällt. Die Einflüsse auf den gesamten Baumbestand am Domplatz sind mit maximal 50 % im Vergleich zum RCP 8.5-Szenario deutlich geringer als für die stark versiegelten Bäume. Insgesamt lässt sich auch für den Domplatz feststellen, dass Kombinationsmaßnahmen aus Entsiegelung und Bewässerung effektive Mitigationsmaßnahmen sind.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die Kombination aus Entsiegelungs- und Bewässerungsmaßnahmen eignen, um die Bäume in ihrer Ökosystemdienstleistungsbereitstellung zu unterstützen und die klimatischen Rückgänge vollständig auszugleichen. Durch die besonders hohen Steigerungswerte kann angenommen werden, dass es sich hierbei um eine geeignete Strategie handelt die Bäume bei anhaltenden Trockenheitsperioden zu unterstützen. Bei der Umsetzung von Bewässerungsmaßnahmen auch in Kombination mit Entsiegelungsmaßnahmen ist ein umfassendes Monitoring des Bodenwassergehaltes zu empfehlen.

4.4 Grenzen der Datengrundlage und Modellierung

Für diese wissenschaftliche Arbeit sind methodische Einschränkungen zu nennen, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden sollten.

Zunächst wird die Erstellung und Aufbereitung des Baumkatasters betrachtet. Einige Parameter des Katasters basieren auf der Analyse von Satellitendaten, wodurch die räumliche Genauigkeit einzelner Baumparameter geringer ausfällt als bei einer Datenerhebung vor Ort. Um fehlerhafte Baumzuordnungen zu korrigieren, mussten zudem potentielle Fehlerquellen herausgerechnet werden, was eine Verzerrung der Ausgangsdaten herbeiführen kann. Für die Bäume, die über Fernerkundung identifiziert und parametrisiert wurden, sind zudem keine Baumartinformationen verfügbar. Diese Individuen konnten folglich nicht in die Simulationen mit einbezogen werden. Es konnten lediglich die Bäume aus dem Kataster simuliert werden. Zudem wurde die Bodenart für das gesamte Stadtgebiet einheitlich als Lehm angenommen, wobei von einer räumlichen Heterogenität der Bodeneigenschaften ausgegangen werden kann. Das liegt daran, dass keine detaillierteren Informationen zur Bodenbeschaffenheit verfügbar waren. Die Annahme eines einheitlichen Bodens aller Bäume des Katasters kann dazu führen, dass die angegebene von der tatsächlichen Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit abweicht und somit das Wachstum, sowie die Ökosystemdienstleistungen der Bäume anders ausfallen. Als eine weitere Einschränkung sind die verwendeten Klimadaten zu nennen. Für die Modellierung mit dem CityTree Model waren keine hinreichend langen Klimazeitreihen für die Stadt Speyer verfügbar, weshalb die Daten für die nahegelegene Stadt Frankfurt verwendet wurden.

Außerdem birgt das für die Simulationen verwendete CityTree Model gewisse Limitationen. Das Modell stellt zwölf Baumarten zur Verfügung, sodass alle weiteren im Kataster enthaltenen Arten diesen Modellbaumarten zugeordnet wurden. Diese Zuteilung kann artspezifische Unterschiede in Wachstum, Wasserhaushalt und Kühlleistung nicht immer passend abbilden. Zudem wird die Vitalität der Bäume im CityTree Modell nicht rechnerisch berücksichtigt, sodass zukünftige Gesundheitszustände, sowie Vorbelastungen nicht in den Simulationen abgebildet werden können. Die Kühlung durch Beschattung, welche die leistungsstärkste der beiden Kühlungsarten darstellt, wird in dieser Arbeit nicht intensiv behandelt, da der Rechenweg im Model unweigerlich zu einer erhöhten Kühlleistung bei erhöhter Strahlungsintensität führt. Bei

dieser Berechnung werden jedoch wichtige Faktoren, wie der Gesundheitszustand der Bäume und dessen Einfluss auf die Blätter und die Dichte der Baumkrone nicht berücksichtigt. Die Berechnung der Entsiegelung wird in Prozentpunkten vorgenommen, weshalb die Bäume unterschiedlich stark entsiegelt werden. Durchschnittliche Werte wie sie im Rahmen dieser Masterarbeit betrachtet werden können verglichen werden. Für zukünftige Analysen, etwa zum Einfluss von Entsiegelungsmaßnahmen auf verschiedene Baumarten, sollten ausschließlich Bäume mit einem vergleichbaren Versiegelungsgrad gegenübergestellt werden.

Auf Grund der genannten methodischen Einschränkungen sind die Ergebnisse als Abschätzung von klimatischen Bedingungen und Maßnahmenwirkungen zu verstehen. Das tatsächliche Wachstum und die Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume des Baumkatasters von Speyer können durch diese Arbeit nicht ermittelt werden. Die Ergebnisse ermöglichen jedoch eine Orientierung bezüglich des aktuellen und zukünftig zu erwartenden Wachstums und Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume. Außerdem können die Einflüsse verschiedener Maßnahmen abgeschätzt und ein Einblick in die klimatischen Mitigationmöglichkeiten der Stadt Speyer geben werden.

4.5 Perspektiven für zukünftige Forschungsarbeiten

Hinsichtlich der durchgeführten Simulationen kann geschlussfolgert werden, dass Entsiegelungsmaßnahmen eine wirkungsstarke und zugleich nachhaltige Strategie zur Optimierung der Ökosystemdienstleistungen von stark versiegelten Stadtbäumen in Speyer darstellen. Das gilt sowohl unter aktuellen als auch unter zukünftigen, erschwerenden Klimabedingungen. Zukünftig sollten jedoch weitere Forschungen durchgeführt werden, um insbesondere die Vitalität der Bäume in die Simulationen mit einbeziehen zu können. Zudem könnte das Baumkataster erweitert werden, indem die Baumart für die mit Fernerkundungsdaten kartierten Bäume durch maschinelles Lernen automatisch bestimmt wird (vgl. Leichtle et al. 2024). Außerdem könnten weitere Simulationen durchgeführt werden, darunter die Maßnahmenauswirkungen unter den Bedingungen eines Trockenjahres. Interessant für die strategische Entwicklung des Baumbestandes in Speyer könnte zudem die Ermittlung der idealen Durchmesser- und Artenzusammensetzung hinsichtlich zukünftiger Klimabedingungen sein. Zusätzlich könnte die Rolle der Baumartenvielfalt als Anpassungsmaßnahme hinsichtlich der Folgen des Klimawandels für Tiere in urbanen Räumen erforscht werden, da Stadtbäume als wichtige Lebensräume und Nahrungsquellen von vielen Tierarten genutzt werden (Aronson et al. 2014). Diese ergänzenden Forschungen würden eine umfassendere Einschätzung und Planungsgrundlage bezüglich der zukünftigen Weiterentwicklung des Baumbestandes in Speyer ermöglichen.

5 Schlussfolgerung - Bedeutung der Ergebnisse für die urbane Baumplanung

Die Simulationsergebnisse des Wachstums und der Ökosystemdienstleistungen der Stadtbäume in Speyer unter verschiedenen zukünftigen Klimaszenarien unterstreichen die Wichtigkeit der Planung und Umsetzung geeigneter Mitigationsmaßnahmen, welche die Leistungsverluste der Bäume unter erschwerten Klimabedingungen verringern, beziehungsweise ausgleichen. Dabei sind insbesondere die Entsiegelungsmaßnahmen zu nennen, welche eine einmalige Investition erfordern und dauerhaft verbesserte Standortbedingungen und Ökosystemdienstleistungen unter aktuellen und zukünftigen Klimabedingungen bereitstellen. Bewässerungsmaßnahmen erzielen ebenfalls hohe Steigerungen der Ökosystemdienstleistungen, welche die der Entsiegelung in der Kühlleistung sogar deutlich übersteigen. Sie führen jedoch lediglich zu temporären Leistungsverbesserungen und sind zudem ressourcenintensiv und personell aufwendig. Aus diesem Grund eignet sich Bewässerung nicht unbedingt als alleinige Anpassungsmaßnahme und sollte möglichst in Kombination mit einem Monitoring der Bodenfeuchte in Betracht gezogen werden. Die Kombination aus Entsiegelung und Bewässerung kann zusätzliche Vorteile erzielen, insbesondere hinsichtlich des Biomassezuwachses beziehungsweise der Kohlenstoffspeicherung bei stark versiegelten Bäumen.

Literaturverzeichnis

Aronson M.F., La Sorte F.A., Nilon C.H., Katti M., Goddard M.A., Lepczyk C.A., Warren P.S., Williams N.S., Cilliers S., Clarkson B., Dobbs C., Dolan R., Hedblom M., Klotz S., Kooijmans J.L., Kühn I., Macgregor-Fors I., McDonnell M., Mörtberg U., Pysek P., Siebert S., Sushinsky J., Werner P., Winter M. (2020). A global analysis of the impacts of urbanization on bird and plant diversity reveals key anthropogenic drivers. *Proc Biol Sci.* 281, doi: 10.1098/rspb.2013.3330.

Azevedo A., Antunes J., Chapman L., Muller C.L. (2016). Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK: A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. *Remote Sensing* 8(2), ab 153. doi: <https://doi.org/10.3390/rs8020153>.

Bao Y., Huang Z., Yin G., Ren S., Yan X., Qi J. (2025). Quantifying the impact of building material stock and green infrastructure on urban heat island intensity. *Building and Environment* 280. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113068>.

Bundesministerium für Gesundheit (BMG) (2025). Gesundheitsrisiko Hitze. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/praevention/hitze.html>. (Zugriff am: 13.01.2026).

Copernicus (2018). Imperviousness Density 2018 (raster 10 m and 100 m), Europe, 3-yearly. URL: <https://land.copernicus.eu/en/products/high-resolution-layer-imperviousness/imperviousness-density-2018> (Zugriff am: 13.01.2026).

Daniel M., Lemonsu A., Viguié V. (2018). Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk. *Future climate Urban Climate* 23, 287-308, doi:10.1016/j.uclim.2016.11.001.

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2025)a. Wetter- und Klimalexikon. URL: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Func-tions/glossar.html?lv3=624852&lv2=101094> (Zugriff am: 13.01.2026).

Deutscher Wetterdienst (DWD) (2025)b. Beitrag zur Minderung gesundheitlicher Hitzefolgen. URL: https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2025/20250923_pm_20-jahre-hitzewarnungen_news.html. (Zugriff am: 13.01.2026).

DWA. (2005). Arbeitsblatt DWA-A 138: Planung, Bau und Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser.

Die Rheinlandpfalz (2023). Erwärmung: Stadt erstellt Hitzeaktionsplan. URL: https://www.rheinpfalz.de/lokal/speyer_artikel,-erwärmung-stadt-erstellt-hitzeaktionsplan-_arid,5534176.html (Zugriff am: 13.01.2026).

Die Rheinlandpfalz (2024). Stadtgrün im Klimastress: Hunderte Bäume müssen gefällt werden. URL: https://www.rheinpfalz.de/lokal/speyer_artikel,-stadtgrün-im-klimastress-hunderte-bäume-müssen-gefällt-werden-_arid,5698044.html (Zugriff am: 13.01.2026).

European Commission (2013). Green infrastructure (GI) – enhancing Europe’s natural capital. URL: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:D41348f2-01d5-4abe-b817-4c73e6f1b2df.0014.03/DOC_1&format=PDF. (Zugriff am: 13.01.2026).

Ferrario F., Mourato J.M., Rodrigues M.S., Dias L.F. (2024). Evaluating Nature-based Solutions as urban resilience and climate adaptation tools: a meta-analysis of their benefits on heatwaves and floods. *The Science of The Total Environment*. doi: 950.175179. 10.1016/j.scitotenv.2024.175179.

GALK e. V. (2018). GALK Straßenbaumliste. Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz.

Gao K., Santamouris M., Feng J. (2020). On the cooling potential of irrigation to mitigate urban heat island. *Science of the Total Environment* 740. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139754.

George K., Ziska L. H., Bunce J. A., Quebedeaux B. (2007). Elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature across an urban–rural transect. *Atmos. Environ* 41, p. 7654–7665. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.08.018.

Gesamtverband der Versicherer (GDV) (2022). Überdurchschnittliche Hitze in Deutschland – bereits 12 Tage mit über 30 Grad in diesem Jahr. URL: <https://www.gdv.de/gdv/medien/medieninformationen/ueberdurchschnittliche-hitze-in-deutschland-bereits-12-tage-mit-ueber-30-grad-in-diesem-jahr-70978>. (Zugriff am: 13.01.2026).

Haupt J., Hack J., Backhaus A. (2025). Targeted irrigation to improve the cooling potential of urban trees as a nature-based solution: Insights from a field trial in Hannover. *Nature-Based Solutions* 8. doi: 10.1016/j.nbsj.2025.100247.

IPCC Climate Change (2023). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Genv, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Jameia E., Rajagopalana P., Seyedmahmoudian M., Jamei Y. (2016). Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 1002-1017. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.104.

Jato-Espino D., Capra-Ribeiro F., Moscardó V., Bartolomé del Pino L.E., Mayor-Vitoria F. Gallardo L.O., Carracedo P., Dietrich K. (2023). A systematic review on the ecosystem services provided by green infrastructure. *Urban Forestry & Urban Greening* 86, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127998>.

Kántor N., Kovács A., Takács A. (2016). Small-scale human-biometeorological impacts of shading by a large tree. *Open Geosci.* 8(1), 231-245. doi: 10.1515/geo-2016-0021.

Köhler M., Gorges J., Andermahr D., Kölz A., Leder B., Nagel R., Mettendorf B., Le Thiec D., Skiadaresis G., Kurz M., Sperisen C., Seifert T., Csilléry K., Bauhus J. (2024). A direct comparison of the radial growth response to drought of European and Oriental beech. *Forest Ecology and Management* 572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122130>.

Kong F.H., Yan W., Zheng G., Yin H., Cavan G., Zhan W., Zhang N., Cheng L. (2016). Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation. *Agric. For. Meteorol.* 217, 22-34. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.11.005.

Lac C., Donnelly R.P., Masson V., Pal S., Riette S., Donier S., Queguiner S., Tanguy G., Ammoura L., Xueref-Remy I. (2013). CO2 dispersion modelling over Paris region within the CO2-megaparis project. *Atmos. Chem. Phys.* 13, 4941–4961, doi: <https://doi.org/10.5194/acp-13-4941-2013>.

Landesamt für Geologie und Bergbau (2025). OGC-Dienste. URL: <https://www.lgb-rlp.de/karten-und-produkte/ogc-dienste#c32725>. (Zugriff am: 13.01.2026).

Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation (2025) (1). Digitales Geländemodell Gitterweite 1m. URL: <https://geoshop.rlp.de/opendata-dgm1.html> (Zugriff am: 13.01.2026).

Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation (2025) (2). Digitales Oberflächenmodell Gitterweite 1m. URL: <https://geoshop.rlp.de/opendata-dom1.html> (Zugriff am: 13.01.2026).

Leichtle T., García de León A., Rötzer T., Martin K., Pauleit S., Taubenböck H., (2024). Abschätzung der Ökosystemleistungen von Stadtbäumen. *AFZ – Der Wald* 8, 16-19.

Liang D., Huang G. (2023). Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. *Land* 12. doi: <https://doi.org/10.3390/land12091699>.

Lopes H.S., Vidal D. G., Cherif N., Silva L., Remoaldo P.C. (2025). Green infrastructure and its influence on urban heat island, heat risk, and air pollution: A case study of Porto (Portugal). *Journal of Environmental Management* 376, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124446>.

Madrigano J., Ito K., Johnson S., Kinney P.L., Matte T. (2015). A case-only study of vulnerability to heat wave–related mortality in New York City (2000–2011). *Environ Health Perspect* 123, 672–678, doi: <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1408178>.

Marando F., Heris M.P., Zulian G., Udías A., Mentaschi L., Chrysoulakis N., Parastatidis D., Maes J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society* 77, doi: [org/10.1016/j.scs.2021.103564](https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564).

Morgenroth J., Nowak D., Koeser A., (2020). DBH Distributions in America's Urban Forests—An Overview of Structural Diversity. *Forests* 11, doi: [10.3390/f11020135](https://doi.org/10.3390/f11020135).

Moser A., Rötzer T., Pauleit S., Pretzsch H. (2015). Structure and ecosystem services of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening* 14(4), doi: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.10.005>.

Moser A., Rötzer T., Pauleit S., Pretzsch H. (2017). Stadtbäume Wachstum, Funktionen und Leistungen. *Risiken und Forschungsperspektiven* 188(5/6), 94-111, doi: [10.23765/afjz0002006](https://doi.org/10.23765/afjz0002006).

Moser-Reischl A., Rötzer T., Pauleit S., Pretzsch H. (2018). Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen - Risiken und Forschungsperspektiven. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* 188. doi: [10.23765/afjz0002006](https://doi.org/10.23765/afjz0002006).

Nabikandi B.V., Rastkhadiv A., Feizizadeh B., Gharibi S., Gomes E. (2025). A scenario-based framework for evaluating the effectiveness of nature-based solutions. *Enhancing habitat quality GeoJournal* 90 (2), 55. doi:[10.1007/s10708-025-11305-9](https://doi.org/10.1007/s10708-025-11305-9).

Niinemets Ü., Valladares F. (2006). Tolerance to shade, drought and waterlogging of temperate northern hemisphere trees and shrubs. *Ecological Monographs* 76, 521-547. doi: [10.1890/0012-9615\(2006\)076\[0521:TTSDAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2006)076[0521:TTSDAW]2.0.CO;2).

Pattnaik N., Honold M., Franceschi E., Moser-Reischl A., Rötzer T., Pretzsch H., Pauleit S., Rahman M.A. (2024). Growth and cooling potential of urban trees across different levels of imperviousness. *Journal of Environmental Management* 361, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121242>.

PIK - Potsdam Institute for Climate Impact Research (2017). ISIMIP2a Simulation Protocol. URL: <http://isimip.org/protocol/#isimip2a>. (Zugriff am: 13.01.2026).

Prodanovic V., Hatt B., Fowdar H., Al-Ameri M., Deletic A. (2022). Zero additional maintenance stormwater biofilters: from laboratory testing to field implementation. *Blue-Green Syst.*, 4 (2), 291-309. doi: [10.2166/bgs.2022.030](https://doi.org/10.2166/bgs.2022.030).

QGIS (2025). Deepness: Deep Neural Remote Sensing. URL: <https://qgis-plugin-deepness.readthedocs.io/en/latest/index.html> (Zugriff am: 13.01.2026).

Rahman M.A., Moser A., Rötzer T., Pauleit, S. (2019). Comparing the transpirational and shading effects of two contrasting urban tree species. *Urban Ecosyst.* 22(4), doi: [10.1007/s11252-019-00853-x](https://doi.org/10.1007/s11252-019-00853-x).

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

Ramke L., Knapp S., Straka T.M. (2025) How does the choice of trees in favour of high carbon storage benefit faunistic biodiversity in urban areas? A systematic review. *Landscape and Urban Planning* 261, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2025.105404>.

Rastkhadiv A., Rahimi A., Russo A. (2025). Assessing the impact of climate-resilient trees as nature-based solutions on users' thermal and psychological comfort in an urban garden. *Journal of Environmental Management* 389,126-121. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126121>.

Richter S., Haase D., Thestorf K., Makki M. (2020). Carbon Pools of Berlin, Germany: Organic Carbon in Soils and Aboveground in Trees. *Urban Forestry & Urban Greening* 54, doi: 10.1016/j.ufug.2020.126777.

Robine J.M., Lan S., Cheung K., Le Roy S., Van Oyen H., Griffiths C., Michel J.P., Herrmann F.R. (2008). Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *Comptes Rendus. Biologies* 331(2), 171-178. doi : 10.1016/j.crvi.2007.12.001.

Robert Koch Institut (RKI) (2025). Hitze und Übersterblichkeit in Deutschland. URL: [https://www.rki.de/DE/Themen/Gesundheit-und-Gesellschaft/Gesundheitliche-Einflussfaktoren-A-Z/H/Hitze/Bericht_Hitzemortalitaet.html?templateQuer-](https://www.rki.de/DE/Themen/Gesundheit-und-Gesellschaft/Gesundheitliche-Einflussfaktoren-A-Z/H/Hitze/Bericht_Hitzemortalitaet.html?templateQueryString=hitze+mortalitaet) yString=hitze+mortalität. (Zugriff am: 13.01.2026).

Rötzer T. (2025). DBH Regressionen München Nov2023.

Rötzer T., Wittenzeller M., Häckel H., Nekovar J. (2000). Phenology in central Europe – differences and trends of spring phenophases in urban and rural areas. *Int J Biometeorol* 44, p. 60–66. doi: 10.1007/s004840000062.

Rötzer T., Reischl A., Rahman M., Pretzsch H., Pauleit S. (2020). Leitfaden zu Stadtbäumen in Bayern. Handlungsempfehlungen aus dem Projekt Stadtbäume – Wachstum, Umweltleistungen und Klimawandel., Hrsg. Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung.

Rötzer T., Rahman M.A., Moser-Reischl A., Pauleit S., Pretzsch H. (2019). Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of The Total Environment* 676, 651-664. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.235>.

Rötzer T., Moser-Reischl A., Rahman M.A., Hartmann C., Paeth H., Pauleit S., Pretzsch H. (2021). Urban tree growth and ecosystem services under extreme drought. *Agricultural and Forest Meteorology* 308–309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108532>.

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

Santamouris M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - a review of the actual developments. In: *Renew. Sust. Energy Rev.* 26, 224-240. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>.

Santamouris M., Vasilakopoulou K. (2024). Urban Climate and Heat Mitigation in Coastal Cities, In: Stamatina Th. Rassia (ed.), *The Blue Book*, 79-85. doi: 10.1007/978-3-031-48831-3_6.

Seeberg G., Hostlowsky A., Huber J., Kamm J., Lincke L., Schwingshackl C. (2022). Evaluating the Potential of Landsat Satellite Data to Monitor the Effectiveness of Measures to Mitigate Urban Heat Islands: A Case Study for Stuttgart (Germany). *Urban Science* 82(6), doi: <https://doi.org/10.3390/urbansci6040082>.

Stone, B., Hess, J.J., Frumkin, H. (2010). Urban Form and Extreme Heat Events: Are Sprawling Cities More Vulnerable to Climate Change than Compact Cities? *Environmental Health Perspectives* 118, 1425-1428. doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.0901879>.

Stadt Speyer (2015). Stadtplan für heiße Tage. URL: <https://www.speyer.de/de/umwelt/klimawandelfolgen/klimawandelspeyerfolgen/stadtplan-fuer-heisse-tage/> (Zugriff am: 13.01.2026).

Stadt Speyer (2025). Stadt Speyer warnt vor Sommerhitze: Lebensgefahr für Kinder, Tiere und steigende Waldbrandgefahr. URL: <https://www.speyer.de/de/rathaus/medieninformationen/aktuelle-informationen/stadt-speyer-warnt-vor-sommerhitze-lebensgefahr-fuer-kinder-tiere-und-steigende-waldbrandgefahr/> (Zugriff am: 13.01.2026).

Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz (2024). Bevölkerung – Kennzahlen im Überblick (Gemeinden) URL: <https://www.statistik.rlp.de/themen/bevoelkerung/daten/bevoelkerungsfortschreibung/bf-t2b> (Zugriff am: 13.01.2026).

Süddeutsche Zeitung (2025). Speyer – ist das Wetter heute normal? URL: <https://www.sueddeutsche.de/projekte/artikel/wetter/speyer-wetter-heute-normal-e235460/> (Zugriff am: 13.01.2026).

SWR (2024). Trotz Hitzerekorden: Viele Kommunen in der Pfalz immer noch ohne Hitzeaktionsplan. URL: <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/ludwigshafen/hitzeaktionstag-was-in-der-pfalz-gegen-hitze-in-der-stadt-getan-wird-102.html> (Zugriff am: 13.01.2026).

Tong S., Prior J., McGregor G., Shi X., Kinney P. (2021). Urban heat: an increasing threat to global health. BMJ. 375(2467). doi: 10.1136/bmj.n2467.

Trapp, J. H., Winker, M., Anterola, J., Brüning, H., Frick-Trzebitzky, F. & Gunkel, M. (Hrsg.). (2020). Blau-grün-graue Infrastrukturen vernetzt planen und umsetzen: Ein Beitrag zu Klimaanpassung in Kommunen: netWORKS. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH. ISBN: 978-3-88118-660-5.

Umweltbundesamt (2025). Veränderung der jahreszeitlichen Entwicklungsphasen bei Pflanzen. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/veraenderung-der-jahreszeitlichen#pflanzen-als-indikatoren-fur-klimaveranderungen> (Zugriff am: 13.01.2026).

Wu Y., Mashhoodi B., Patuano A. (2025). Effective street tree and grass designs to cool European neighbourhoods. Urban Climate 61. doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102376>.

Zentrum Stadtnatur und Klimaanpassung (ZSK) (2024). Interactive guideline for urban trees, URL: <https://master.d3jwj4wl3ttyob.amplifyapp.com> (Zugriff am: 13.01.2026).

Anhang

Anhang 1 Baumartenzuordnung der Bäume des Baumkatasters der Stadt Speyer. Zuordnung der Toleranz gegenüber Trockenheit und Beschattung nach Niinemets and Valadares 2006, Baumartenzuordnungsvergleich von Schadel 2024 und Landmann 2024, sowie eigene Zuordnung fehlender Baumarten des Katasters und der Trockenheitstoleranzklassen niedrig, mittel und hoch. Nr. = Baumnummer im CityTree Model.

Legende

Konifer aber wurde einem Laubbaum zugeordnet
nicht im Appendix Niinemets u. Valladares 2006,
unsichere Zuordnung

Zuordnung nicht möglich

Baumarten im City Tree Model

Art welche ein Strauch oder Konifere ist

Baumkataster Speyer n = Baumanzahl		Zuordnung Gruppe	Niinemets & Valadares 2006		Zurodnung Baumart		Zurodnung fehlender Baumarten (links) und Trockenheitstoleranz (rechts)		
			Toleranz gegenüber						
Baumart	n	Strauch (S), Konifere (K); Laubbaum (L)	Troc kenh eit	Besc hatt ung	nach Schadel 2024	nach Landman n (2024)	nach Kamm (2026)	nach Kamm (2026)	N r .
Abies alba	2	K							0
Abies cephalonica	1	K							0
Abies concolor	5	K							0
Abies nordmanniana	1 5	K							0
Abies procera 'Glauca'	1	K							0
Acer buergerianum	2	L	3	2,75			Quercus robur	hoch	1 1
Acer campestre	1 2 2 2	L	2,93	3,18	Aesculus hippocast anum	Aesculus hippocast anum		mittel	4
Acer campestre Élsrijk'	1 3 0	L	2,93	3,18			Aesculus hippocastanum	mittel	4
Acer campestre Huibers Elegant	5	L	2,93	3,18			Aesculus hippocastanum	mittel	4
Acer cappadocicum 'Rubrum'	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer cissifolium	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer freemanii 'Armstrong'	7	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer ginnala	5	L	2,88	3			Quercus robur	mittel	1 1
Acer laetum 'Rubrum'	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer monspessulanum	1 1	L	2,66	4,31			Acer platanoides	mittel	5
Acer negundo	1 1 3	L	3,03	3,47	Platanus x acerifolia	Platanus x acerifolia		hoch	3

Acer negundo Áureo-Variegatum`	1	L	3,03	3,47			Platanus x acerifolia	hoch	3
Acer palmatum	2	L	4,19	1,77			Acer platanoides	hoch	5
Acer platanoides	9 8 4	L	2,73	4,2			Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Apollo`	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Emerald Queen`	4 0	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides Allershausen	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Cleveland`	1 0	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Eurostar`	8 8	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Faassen`s Black`	2	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Fairview`	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Globosum`	8 9	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Olmstedt`	8	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Royal Red`	7	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Schwedleri`	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Summershade`	8 9	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides `Superform`	2	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer platanoides Columnare	2 5	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer pseudoplatanus	1 3 5 6	L	2,75	3,73			Acer pseudoplatanus	mittel	6
Acer pseudoplatanus `Bruchem`	1	L					Acer pseudoplatanus	mittel	6
Acer pseudoplatanus `Leopoldii`	6	L					Acer pseudoplatanus	mittel	6
Acer pseudoplatanus `Rotterdam`	9	L					Acer pseudoplatanus	mittel	6
Acer rubrum	1 3	L	1,84	3,44			Acer pseudoplatanus	niedrig	6
Acer rubrum `Scanlon`	2	L					Acer pseudoplatanus	mittel	6
Acer rufrinerve	1	L					Acer platanoides	mittel	5
Acer saccharinum	7 3	L	2,88	3,6	Aesculus hippocast anum	Aesculus hippocast anum		mittel	4
Acer saccharinum `born`s graciosus`	3	L	2,88	3,6			Aesculus hippocastanum	mittel	4
Acer saccharinum `Laciniatum Wieri`	1 1	L	2,88	3,6			Aesculus hippocastanum	mittel	4
Acer saccharinum `Lutescens`	1	L	2,88	3,6			Aesculus hippocastanum	mittel	4
Acer tataricum	1	L	3,37	3,48			Platanus x acerifolia	hoch	3

Acer truncatum 'Pacific Sunset'	6	L	2,75	3			Acer pseudoplatanus	mittel	6
Aesculus carnea	9 6	L			Aesculus hippocast anum	Aesculus hippocast anum		mittel	4
Aesculus flava 'Vestita'	7 8	L	2	4,14			Fagus sylvatica	mittel	9
Aesculus hippocastanum	5 5 4	L	2,82	3,43				mittel	4
Aesculus hippocastanum 'Baumannii'	2 8	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Aesculus x carnea 'Briotii'	1 6 0	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ailanthus altissima	3 2	L	2,96	2,44	Quercus robur	Quercus robur		mittel	1 1
Albizzia julbrissin	6	L						0	
Alnus cordata	4 5	L				Fraxinus excelsior		mittel	7
Alnus glutinosa	2 0 2	L	2,22	2,71	Fraxinus excelsior	Fraxinus excelsior		mittel	7
Alnus incana	4	L	1,89	2,3	Fraxinus excelsior	Fraxinus excelsior		niedrig	7
Alnus x spaethii	2	L				Fraxinus excelsior		mittel	7
Amelanchier alnifolia Obelisk	1 7	S						0	0
Amelanchier canadensis	1	S						0	0
Amelanchier lamarckii	2 4	S						0	0
Betula ermanii Mount Apo'	3 2	L	2	1,25			Betula pendula	mittel	8
Betula pendula	5 6 1	L	1,85	2,03			Betula pendula	niedrig	8
Betula pendula Youngii'	2	L					Betula pendula	niedrig	8
Betula utilis 'Doorenbos'	1 7	L					Betula pendula	niedrig	8
Calocedrus	1	L					Platanus x acerifolia	hoch	3
Carpinus betulus	7 7 0	L						mittel	1 2
Carpinus betulus 'Fastigiata'	1 2 4	L					Carpinus betulus	mittel	1 2
Carpinus betulus 'Frans Fontaine'	2 6	L					Carpinus betulus	mittel	1 2
Carya cordiformis	1	L	4	2,07			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Castanea sativa	5 7	L				Aesculus hippocast anum		mittel	4
Catalpa bignonioides	1 3	L				Fraxinus excelsior		mittel	7
Catalpa bignonioides 'Aurea'	3	L					Fraxinus excelsior	mittel	7

Catalpa bignonioides 'Nana'	2	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Catalpa x erubescens 'Purpurea'	1	L					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Cedrela sinensis	2	L					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Cedrus atlantica	8	K						0	0
Cedrus atlantica 'Glaucula'	1 6	K						0	0
Cedrus atlantica 'Glaucula Pyramidalis'	1	K						0	0
Cedrus deodora	8	K						0	0
Cedrus deodora 'Pendula'	1	K						0	0
Cedrus libani	2	K						0	0
Celtis australis	3 1	L				Platanus x acerifolia		hoch	3
Celtis occidentalis	1	L	3,85	3,17			Platanus x acerifolia	hoch	3
Cercidiphyllum japonicum	2 4	L				Betula pendula		niedrig	8
Cercis canadensis 'Forest Pansy'	1	S						0	0
Cercis siliquastrum	1 3 4	S						0	0
Chamaecyparis lawsoniana	1 5	K						0	0
Chamaecyparis lawsoniana 'Alumii'	3	K						0	0
Chamaecyparis nootkatensis 'Pendula'	4	K						0	0
Cladastris kentukea	1	SL					Aesculus hippocastanum	hoch	4
Cladastris lutea	3	SL					Platanus x acerifolia	hoch	3
Clerodendrum trichotmum	1	SL	3	1,33			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Colutea arborescens	1	S						0	0
Cornus controversa	2	S						0	0
Cornus mas	1 0	S				Platanus x acerifolia		0	0
Corylus colurna	2 4 1	L	3,13	1,35	Quercus robur	Quercus robur		hoch	1 1
Cotinus coggygria 'Royal Purple'	2	S						0	0
Crataegus 'Carrierei'	1 0 1	SL					Quercus robur	hoch	1 1
Crataegus crus-galli	1	SL				Quercus robur		hoch	1 1
Crataegus laevigata 'Paul's Scarlet'	2 3	SL					Quercus robur	hoch	1 1

Crataegus lavalleyi	7	SL				Quercus robur		hoch	1 1
Crataegus monogyna	2 7	SL	3,46	1,93	Robinia pseudoacacia	Robinia pseudoacacia		hoch	2
Crataegus monogyna 'Stricta'	9	SL					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Crataegus x persimilis 'Splendens'	1 1	SL					Quercus robur	hoch	1 1
Cupressus arizonica	6	K						0	0
Cydonia oblonga	1 1	SL				Quercus robur		hoch	1 1
Davidia involucrata var. Vilmoriniana	2	L				Tilia cordata		mittel	1
Eleagnus angustifolia	8	S						0	0
Eucommia ulmoides	2	L					Tilia cordata	mittel	1
Euodia hupehensis	1 8	L				Tilia cordata		mittel	1
Evodia rutaecarpa	9	S						0	0
Fagus sylvatica	1 5 1	L						mittel	9
Fagus sylvatica 'Aspleniifolia'	1	L					Fagus sylvatica	mittel	9
Fagus sylvatica 'Pendula'	2	L					Fagus sylvatica	mittel	9
Fagus sylvatica Dawyck Purple	2	L					Fagus sylvatica	mittel	9
Fagus sylvatica f. purpurea	1 1	L					Fagus sylvatica	mittel	9
Fagus sylvatica 'Atropunicea'	7	L					Fagus sylvatica	mittel	9
Fraxinus angustifolia 'Raywood'	6 5	L			Platanus x acerifolia	Platanus x acerifolia		hoch	3
Fraxinus excelsior	8 7 5	L						mittel	7
Fraxinus excelsior 'Althana'	3 8	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Fraxinus excelsior 'Globosum'	3 6	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Fraxinus excelsior 'Nana'	1 5	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Fraxinus excelsior 'Pendula'	4	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Fraxinus ornus	4 3	L	4,31	3,02	Platanus x acerifolia	Platanus x acerifolia		hoch	3
Fraxinus ornus 'Obelisk'	3 1	L	4,31	3,02			Platanus x acerifolia	hoch	3
Fraxinus pennsylvanica 'Summit'	1	L				Fraxinus excelsior		mittel	7
Ginkgo biloba	1 1 1	L	3,99	1,34	Robinia pseudoacacia	Robinia pseudoacacia		hoch	2
Ginkgo biloba 'Fastigiata'	2	L	3,99	1,34			Robinia pseudoacacia	hoch	2

Ginkgo biloba 'Princeton Sentry'	3	L	3,99	1,34			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Gleditsia triacanthos	1 1 2	L	4,98	1,61	Robinia pseudoacacia	Robinia pseudoacacia		hoch	2
Gleditsia triacanthos 'Shademaster'	1	L	4,98	1,61			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Gleditsia triacanthos 'Skyline'	4 0	L	4,98	1,61			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Gleditsia triacanthos 'Sunburst'	1	L	4,98	1,61			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Gymnocladus dioicus	6	L				Platanus x acerifolia		hoch	3
Halesia carolina	1	L	2	3,06			Fagus sylvatica	mittel	9
Hippophae rhamnoides	1	S				Robinia pseudoacacia		0	0
Idesia polycarpa	3	L						0	
Ilex aquifolium	3 5	S	3,04	3,38				hoch	0
Juglans nigra	2 0	L				Quercus robur		mittel	1 1
Juglans regia	1 0 5 8	L	2,98	2,27	Quercus robur	Quercus robur		mittel	1 1
Juniperus communis	8	K						0	0
Juniperus chinensis	3	K						0	0
Koelreuteria paniculate	7 2	LS	4,47	2,09			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Koelreuteria paniculata Fastigiata	2	LS					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Laburnum officinalis	1	LS				Betula pendula		niedrig	8
Larix decidua	6	K	2,31	1,46	Quercus robur	Quercus robur		mittel	0
Liquidambar styraciflua	4 1	L	2,92	1,59	Quercus robur	Quercus robur		mittel	1 1
Liquidambar styraciflua 'Slender Silhouette'	1 0	L	2,92	1,59			Quercus robur	mittel	1 1
Liriodendron tulipifera	1 8	L				Fraxinus excelsior		mittel	7
Liriodendron tulipifera 'Fastigiatum'	5	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Maclura pomifera	1 5	L	4,22	1,45			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Magnolia 'Galaxy'	1 1	SL					Fraxinus excelsior	mittel	7
Magnolia grandiflora	2	SL					Fraxinus excelsior	mittel	7
Magnolia kobus	6	SL				Fraxinus excelsior		mittel	7
Magnolia kobus 'Isis'	1	SL					Fraxinus excelsior	mittel	7

Magnolia liliiflora `Nigra`	2	SL					Fraxinus excelsior	mittel	7
Magnolia stellata	3	SL	1,77	3			Fraxinus excelsior	niedrig	7
Magnolia x soulangeana	5	SL	1,77	3			Fraxinus excelsior	niedrig	7
Malus	2 1 0	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Clascoynes Scharlachroter`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus Butterball	1	L				Quercus robur		mittel	1 1
Malus `Gravensteiner`	5	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Luxemburger Triumph`	2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Zabergäu Renette`	2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Adamsapfel`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Alkmene`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Ananasrenette`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Birnenförmiger Winterapfel`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Börtlinger Weinapfel`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Brettacher`	1 2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Carpentin`	4	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Champagner Renette`	4	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Christkindler`	8	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Clapps Liebling`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Danziger Kantapfel`	2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Dörflinger`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Eifeler Rambour`	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Freinsheimer Tafelapfel`	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Gehrsers Rambur`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Goldparmäne`	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Goldrenette von Blenheim`	6	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Grasblümchen`	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus `Graue Herbstrenette`	2	L					Quercus robur	mittel	1 1

Malus 'Heimeldinger Winterapfel'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Heimeldinger'	1 0	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Herrgottsapfel'	5	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Hilde'	2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Hopa'	7	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Ingrid Marie'	5	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Jakob Fischer'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Jakob Lebel'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Kaiser Wilhelm'	1 1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Kalbfleisch'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Karthäuserapfel'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Kassler Renette'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Ladenburger Renette'	4	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Leistadter Rotapfel'	8	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Mosel- Eisenapfel'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Neckartaler'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Pfälzer Schafsnase'	8	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Pinova'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Prinz Albrecht von Düren'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Prinzenapfel'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Rheinischer Bohnapfel'	4	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Rheinischer Winterapfel'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Rheinischer Winterrambur'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Rote Sternnette'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Roter Boskoop'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Roter Herbstkalvill'	2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Schöner von Boskoop'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Spätblühender Tafelapfel'	2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Malus 'Taffet'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1

Malus 'Topaz'	1	L					Quercus robur	mittel	1
Malus 'Weißer Klarapfel'	3	L					Quercus robur	mittel	1
Malus 'Weißer Winterglockenapfel'	1	L					Quercus robur	mittel	1
Malus domestica Elstar	3	L	3,04	1,93	Quercus robur	Quercus robur		hoch	1
Malus floribunda	1	L					Quercus robur	mittel	1
Malus 'Oberländer Himbeerapfel'	1	L					Quercus robur	mittel	1
Malus Ontario'	2	L					Quercus robur	mittel	1
Malus tschonoskii	9	L					Quercus robur	mittel	1
Malus 'Bachapfel'	1	L					Quercus robur	mittel	1
Mespilus germanica	6	L					Quercus robur	mittel	1
Metasequoia glyptostroboides	1 6	K						0	0
Morus alba	8	S				Quercus robur		0	0
Morus nigra	1 9	SL					Quercus robur	mittel	1
Nyssa sylvatica	4	L				Carpinus betulus		mittel	1
Ostrya carpinifolia	3 7	L				Carpinus betulus		mittel	1
Parrotia persica	7	SL				Carpinus betulus		mittel	1
Parrotia persica 'Vanessa'	1	SL					Carpinus betulus	mittel	1
Paulownia tomentosa	1 7	L	3	2			Quercus robur	hoch	1
Phellodendron amurense	7	L	4,1	1,67			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Picea abies	1 3 1	K	1,75	4,45				niedrig	0
Picea abies 'Virgata'	1	K						0	0
Picea omorika	4 2	K						0	0
Picea orientalis	3	K						0	0
Picea pungens 'Glauca'	1 2	K						0	0
Pinus cembra	3	K						0	0
Pinus nigra ssp. nigra	1 3 2	K	4,38	2,1				0	0
Pinus pinea	1	K						0	0
Pinus ponderosa	2	K						0	0
Pinus strobus	6	K						0	0
Pinus sylvestris	2 8 2	K	4,34	1,67					0

Platanus x acerifolia	7 0 3	L						hoch	3
Populus alba 'Nivea'	1 8 2	L	2,67	2,3			Quercus robur	mittel	1 1
Populus balsamifera	1 0 5	L	1,77	1,27			Betula pendula	niedrig	8
Populus nigra	7 0	L					Populus nigra 'Italica'	mittel	1 0
Populus nigra 'Italica'	5 5 1	L						mittel	1 0
Populus tremula	4 5	L	2,85	2,22	Quercus robur	Quercus robur		mittel	1 1
Populus tremula 'Erecta'	3	L	2,85	2,22			Quercus robur	mittel	1 1
Populus tremula 'Pyramidalis'	1	L	2,85	2,22			Quercus robur	mittel	1 1
Populus x canadensis 'Robusta'	1 0 5	L	1,77	1,67			Betula pendula	niedrig	8
Populus x canescens	2 5	L	2,21	2,66			Fraxinus excelsior	mittel	7
Populus x euramericana 'Robusta'	6 7 3	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Prunus com. Von Nancy	2	L					Betula pendula	niedrig	8
Prunus 'Accolade'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus 'Dulcis'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus amygdalus	2 2	SL					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus amygdalus persica	1	SL					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus amygdalus persica Angelique	7	SL					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus armeniaca 'Kuresia'	2	L	2,75	1,35			Quercus robur	mittel	1 1
Prunus avium	4 0 2	L	2,66	3,33	Carpinus betulus	Carpinus betulus		mittel	1 2
Prunus avium 'Burlat'	4	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus avium 'Büttner's RT. Knorpelkirsche'	2	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus avium 'Freinsheimer Schlosskirsche'	1	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus avium 'Große Prinzessinkirsche'	1	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus avium 'Große Schwarze Knorpelkirsche'	2	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus avium 'Hedelfinger Riesenkirsche'	1	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus avium 'Kordia'	1	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2

Prunus avium 'Plena'	8	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus avium 'Speyerer Maikirsche'	3	L	2,66	3,33			Carpinus betulus	mittel	1 2
Prunus cerasifera	2	SL	2,9	2,45	Quercus robur	Quercus robur		mittel	1 1
Prunus cerasifera 'Nigra'	3 0	SL	2,9	2,45			Quercus robur	mittel	1 1
Prunus dom. 'Hanita'	1	L					Betula pendula	niedrig	8
Prunus domestica	6 9	L	2,9	1,93			Quercus robur	mittel	1 1
Prunus domestica 'Bühler Frühzwetsche'	2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus domestica 'Kandler Zuckerzwetsche'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus domestica 'Kirkespflaume'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus domestica 'Lambsheimer Kurzstiel'	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus domestica 'Bühler Frühe Weisenheim'	1	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus dulcis Supernova	4	L					Quercus robur	mittel	1 1
Prunus fruticosa 'Globosa'	8	L	4,31	1,47			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Prunus lusitanica	4	SL	3,5	2,5			Platanus x acerifolia	hoch	3
Prunus maackii 'Amber Beauty'	2 4	L	2	1,5			Betula pendula	mittel	8
Prunus mahaleb	1 4 6	SL	4,31	2,29			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Prunus padus	2 7	SL	1,93	3,26	Betula pendula	Betula pendula		niedrig	8
Prunus padus Tiefurt	8	SL	1,93	3,26			Betula pendula	niedrig	8
Prunus persica	1	L	2,38	1,67			Quercus robur	mittel	1 1
Prunus sargentii	1	L	2,88	2,13			Betula pendula	mittel	8
Prunus serotina	8	SL	3,02	2,46			Quercus robur	hoch	1 1
Prunus serrulata	8	L					Acer pseudoplatanus	mittel	6
Prunus serrulata 'Amanogawa'	1 3	L	2,75	2,34			Acer pseudoplatanus	mittel	6
Prunus serrulata 'Kanzan'	4 8	L	2,75	2,34			Acer pseudoplatanus	mittel	6
Prunus serrulata 'Pink Perfektion'	1	L	2,75	2,34			Acer pseudoplatanus	mittel	6
Prunus serrulata 'Royal Burgundy'	1	L	2,75	2,34			Acer pseudoplatanus	mittel	6
Prunus serrulata 'Shirofugen'	3	L	2,75	2,34			Acer pseudoplatanus	mittel	6
Prunus spinosa	2 7	SL	3,46	1,86			Robinia pseudoacacia	hoch	2

Prunus subhirtella	1	L	2,38	2,09		Quercus robur	mittel	1 1
Prunus subhirtella ‘Autumnalis’	1	L				Quercus robur	mittel	1 1
Prunus subhirtella ‘Fukubana’	6	L				Quercus robur	mittel	1 1
Prunus Umineko	4	SL				Betula pendula	niedrig	8
Prunus x gondouinii ‘Schnee’	9	L				Quercus robur	mittel	1 1
Prunus x hillieri ‘Spire’	8 8	L				Betula pendula	niedrig	8
Prunus x yedoensis	2 3	L				Quercus robur	mittel	1 1
Pseudotsuga menziesii var. caesia	1 3	K	2,62	2,78			mittel	0
Pterocarya fraxinifolia	3 9	L			Betula pendula		niedrig	8
Pyrus	5 7	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus ‘Frankelbacher Weinbirne’	1	L				Quercus robur	mittel	1 1
Pyrus calleryana ‘Chanticleer’	1 6 4	L	4,47	1,35		Robinia pseudoacacia	hoch	2
Pyrus com ‘Frühe von Trevoux’	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com ‘Nußlocher Kotäckerle’	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. Mostbirne	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. Pankratius	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Beste Birne/ Sommereierbirne’	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Bimmbirne’	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Clapps Liebling’	2	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Ettenbirne’	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Frankelbacher Mostbirne’	6	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Großer Katzenkopf’	2	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Gute Graue’	9	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Gute Laune’	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Herbstfeigenbirne’	2	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Julimostbirne’	1	L				Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. ‘Kaisebirne mit Eichenblatt’	3	L				Fraxinus excelsior	mittel	7

Pyrus com. 'Knaursbirne'	3	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Köstliche v. Charneu'	2	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Napoleon'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Rosenwasserbirne'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Scheuberling'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Seitersbirne'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Sievernicker Mostbirne'	2	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Stuttgarter Geißhirtel'	3	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Veldenzer'	3	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Waldseer Gewürzbirne'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Williams Christ'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. Welsch Bratbirne'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Alexander Lucas'	3	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Conferencebi rne'	3	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Gute Luise v. Avanches'	8	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus com. 'Champagner Bratbirne'	5	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis	7 2	L	2,73	2,72			Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis Abrahamchen'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis 'Beech Hill'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis 'Frankelbache Mostbirne'	5	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis 'Gellerts Butterbirne'	7	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis 'Gräfin von Paris'	6	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis 'Vereinsdechant'	2	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Pyrus communis 'Pastore nbirne'	4	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Quercus cerris	3 2	L					Quercus robur	mittel	1 1
Quercus coccinea	1	L	4	2,07			Robinia pseudoacacia	hoch	2

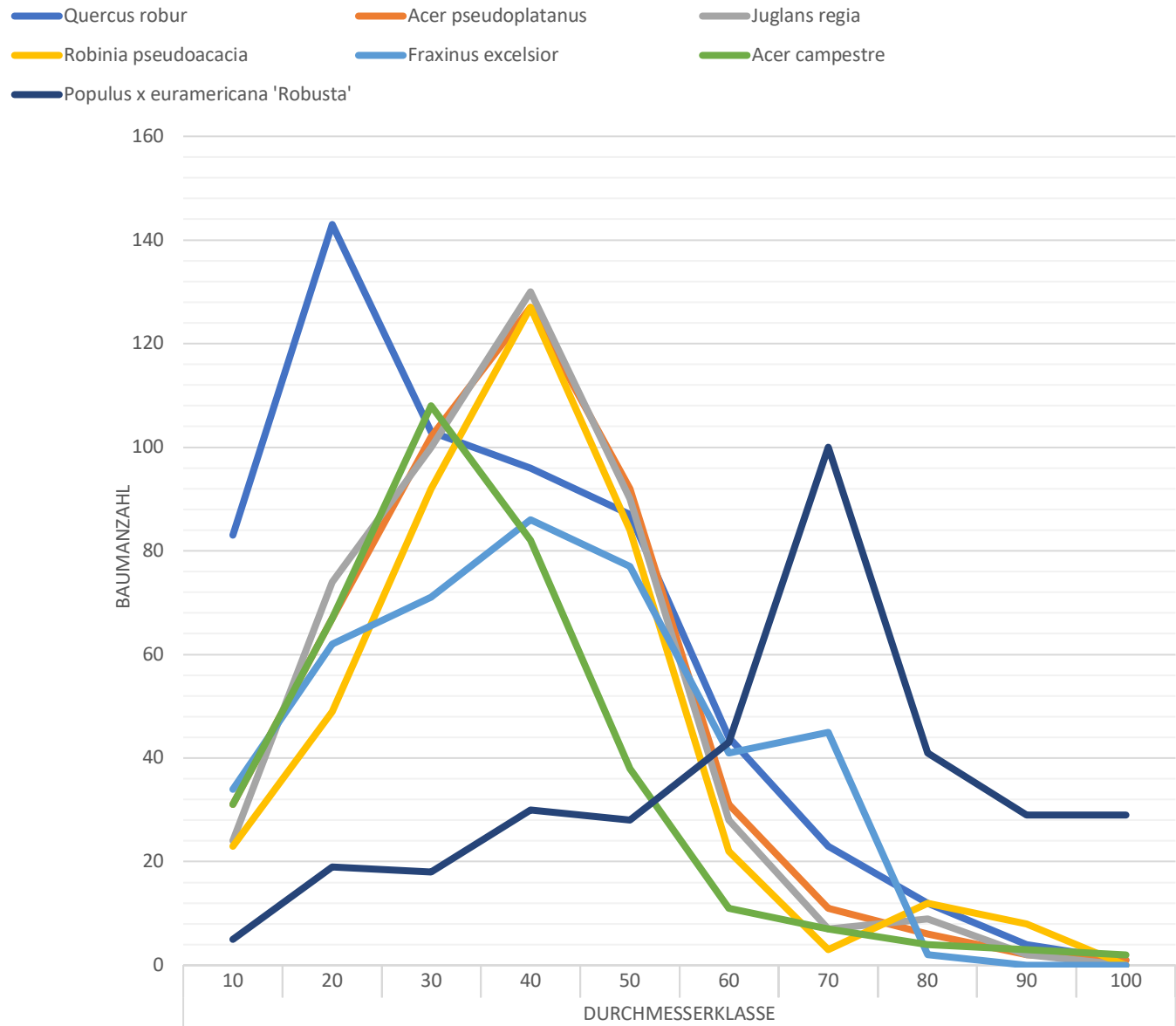
Quercus frainetto	8 4	L				Quercus robur		mittel	1 1
Quercus ilex	4	L	4,72	3,02			Robinia pseudoacacia	hoch	2
Quercus palustris	1	L	2,38	2,49	Fagus sylvatica	Fagus sylvatica		mittel	9
Quercus petraea	4	L	3,02	2,73	Quercus robur	Quercus robur		hoch	1 1
Quercus phellos	1	L	1	2			Betula pendula	niedrig	8
Quercus robur	1 1 7 3	L	2,95	2,45				mittel	1 1
Quercus robur 'Fastigiata'	1 7 2	L	2,88	2,75			Quercus robur	mittel	1 1
Quercus rubra	8 9	L	2,88	2,75	Quercus robur	Quercus robur		mittel	1 1
Quercus suber	3	L					Quercus robur	mittel	1 1
Quercus x turneri 'Pseudoturneri'	4	L					Carpinus betulus	mittel	1 2
Rhus typhina	4	L						0	
Robinia pseudoacacia	1 0 8 9	L						hoch	2
Robinia pseudoacacia 'Bessoniana'	7	L					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Robinia pseudoacacia 'Tortuosa'	1	L					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Robinia pseudoacacia 'Umbraculifera'	7	L					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Robinia pseudoacacia 'Unifoliola'	6	L					Robinia pseudoacacia	hoch	2
Salix 'Sekka'	1	S						0	0
Salix 'Tortuosa'	2 9	L	2	1,99			Betula pendula	mittel	8
Salix alba	7 6 8	L	2	1,99	Betula pendula	Betula pendula		mittel	8
Salix alba 'Tristis'	1 3	L	2	1,99			Betula pendula	mittel	8
Salix alba 'Liempde'	1 6	L	2	1,99			Betula pendula	mittel	8
Salix alba 'Tristis'	1 7	L	2	1,99			Betula pendula	mittel	8
Salix caprea	1 0	SL	2,24	2,16	Fagus sylvatica	Fagus sylvatica		mittel	9
Sambucus nigra	1	S						0	0
Sequoia sempervirens	1		2	4,21			Fagus sylvatica	mittel	9
Sequoiadendron giganteum	2 2	S						0	0
Sorbus aria	3 3	L	3,55	3	Platanus x acerifolia	Platanus x acerifolia		hoch	3
Sorbus aria 'Magnifica'	3 1	L	3,55	3			Platanus x acerifolia	hoch	3

Sorbus aucuparia	2 3	L	2,11	2,73	Fraxinus excelsior	Fraxinus excelsior		mittel	7
Sorbus dodong	2 9	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Sorbus domestica	1 2	L				Platanus x acerifolia		hoch	3
Sorbus intermedia	9	L	2,21	2,66	Fraxinus excelsior	Fraxinus excelsior		mittel	7
Sorbus latifolia 'Henk Vink'	1	L					Fraxinus excelsior	mittel	7
Sorbus torminalis	1 4	L	3,74	3,38			Platanus x acerifolia	hoch	3
Sorbus x thuringiaca	2	L					Platanus x acerifolia	hoch	3
Sorbus x thuringiaca 'Fastigiata'	2 8	L				Platanus x acerifolia		hoch	3
Styphnolobium japonica	6 9	L			Platanus x acerifolia	Platanus x acerifolia		hoch	3
Styphnolobium japonica 'Regent'	1	L					Platanus x acerifolia	hoch	3
Styphnolobium japonica pendula	4	L					Platanus x acerifolia	hoch	3
Taxodium distichum	1 2	K						0	0
Taxus baccata	2 1 4	K	3,01	4,43					0
Taxus baccata 'Dovastoniana'	3	K						0	0
Taxus baccata 'Dovastonii Aurea'	4	K						0	0
Taxus baccata 'Fastigiata'	2	K						0	0
Taxus baccata 'Osterberg'	3	K						0	0
Thuja occidentalis	3 4	K						0	0
Thuja orientalis	1 0	K						0	0
Tilia americana 'Nova'	1 9 8	L	2,88	3,98			Carpinus betulus	mittel	1 2
Tilia cordata	3 3 8	L						0	1
Tilia cordata 'Greenspire'	2 5 2	L					Tilia cordata	mittel	1
Tilia cordata 'Rancho'	6	L					Tilia cordata	mittel	1
Tilia mongolica	4	L					Tilia cordata	mittel	1
Tilia platyphyllos	1 2 6	L	2,52	4	Carpinus betulus	Carpinus betulus		mittel	1 2
Tilia platyphyllos 'Herziana'	3	L	2,52	4			Carpinus betulus	mittel	1 2
Tilia platyphyllos 'Rubra'	2 0	L	2,52	4			Carpinus betulus	mittel	1 2

Tilia tomentosa	3 3 7	L	2,81	3,34	Aesculus hippocast anum	Aesculus hippocast anum		mittel	4
Tilia tomentosa 'Brabant'	2	L	2,81	3,34			Aesculus hippocastanum	mittel	4
Tilia tomentosa Szeleste	4 5	L	2,81	3,34			Aesculus hippocastanum	mittel	4
Tilia x euchlora	7 7	L	2,75	3	Platanus x acerifolia	Platanus x acerifolia		mittel	3
Tilia x intermedia	1 3	L			Tilia cordata	Tilia cordata		mittel	1
Tilia x intermedia 'Pallida'	3 0 6	L					Tilia cordata	mittel	1
Tsuga canadensis	4	K	1	4,83				niedrig	0
Ulmus 'Columella'	1 6	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ulmus 'New Horizon'	1 4 9	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ulmus 'Rebona'	2 7	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ulmus carpinifolia	1 8	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ulmus dodoens	1	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ulmus glabra	9 6	L	2,41	3,53	Aesculus hippocast anum	Aesculus hippocast anum		mittel	4
Ulmus hollandica 'Plantijn'	1 3 3	L				Aesculus hippocast anum		mittel	4
Ulmus Hybride 'Lobel'	8	L				Aesculus hippocast anum		mittel	4
Ulmus Hybride 'Plantijn'	1 5	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ulmus laevis	1 2	L				Aesculus hippocast anum		mittel	4
Ulmus minor	9	L				Aesculus hippocast anum		mittel	4
Ulmus Rebona	2	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
Ulmus sapporo Atumn Gold	3	L					Aesculus hippocastanum	mittel	4
x Cupressocyparis leylandii	7 7	K							0
Zelkova serrata	1 9	L				Quercus robur		mittel	1 1
Zelkova serrata 'Green Vase'	1 9	L					Quercus robur	mittel	1 1

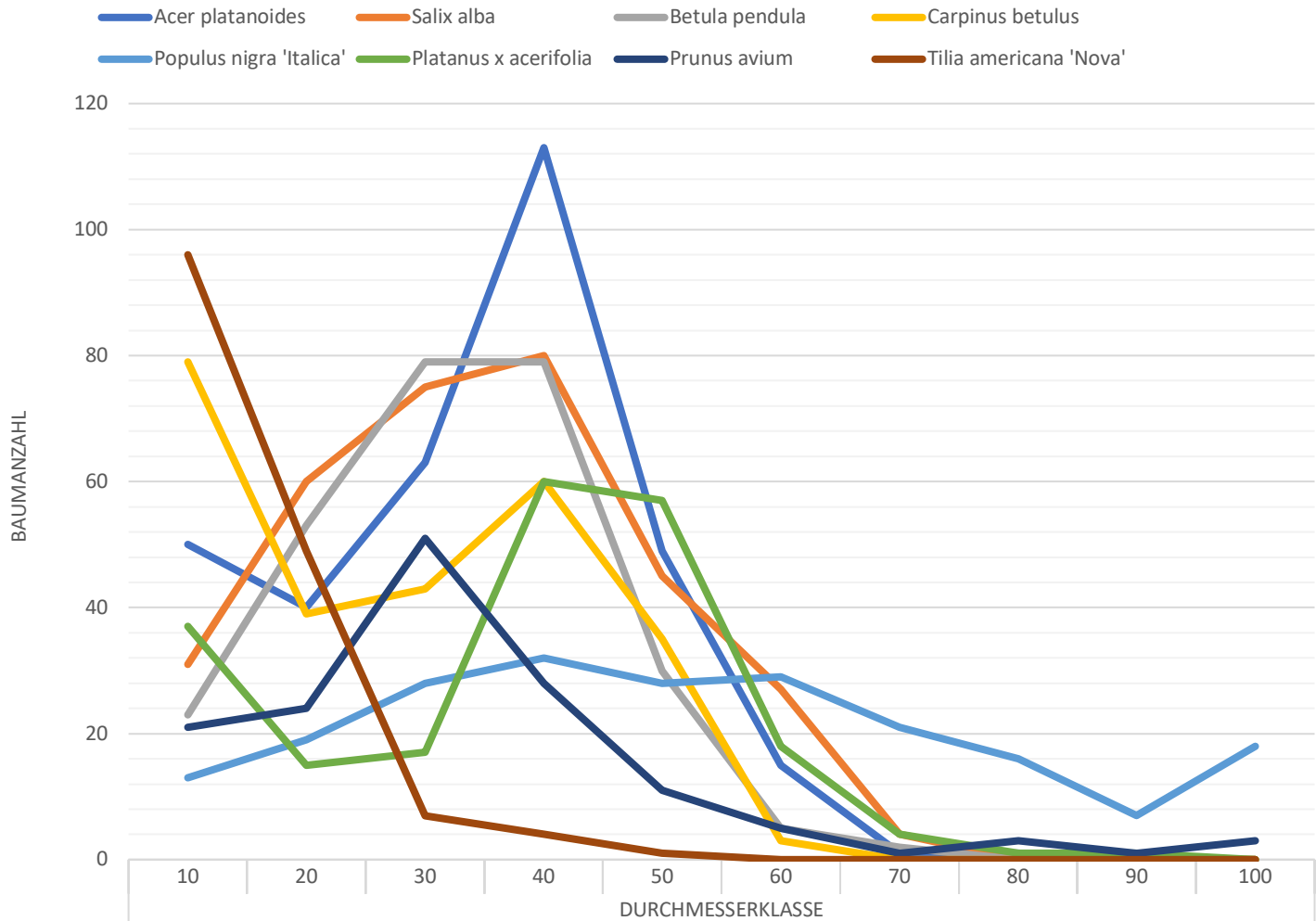
Anhang 2 Verteilung der Durchmesserklassen von den fünfzehn am häufigsten vorkommenden Baumarten in Speyer. Daten basierend auf bereitgestelltem Kataster (2025).

Anzahl Bäume je Baumart nach Durchmesserklassen



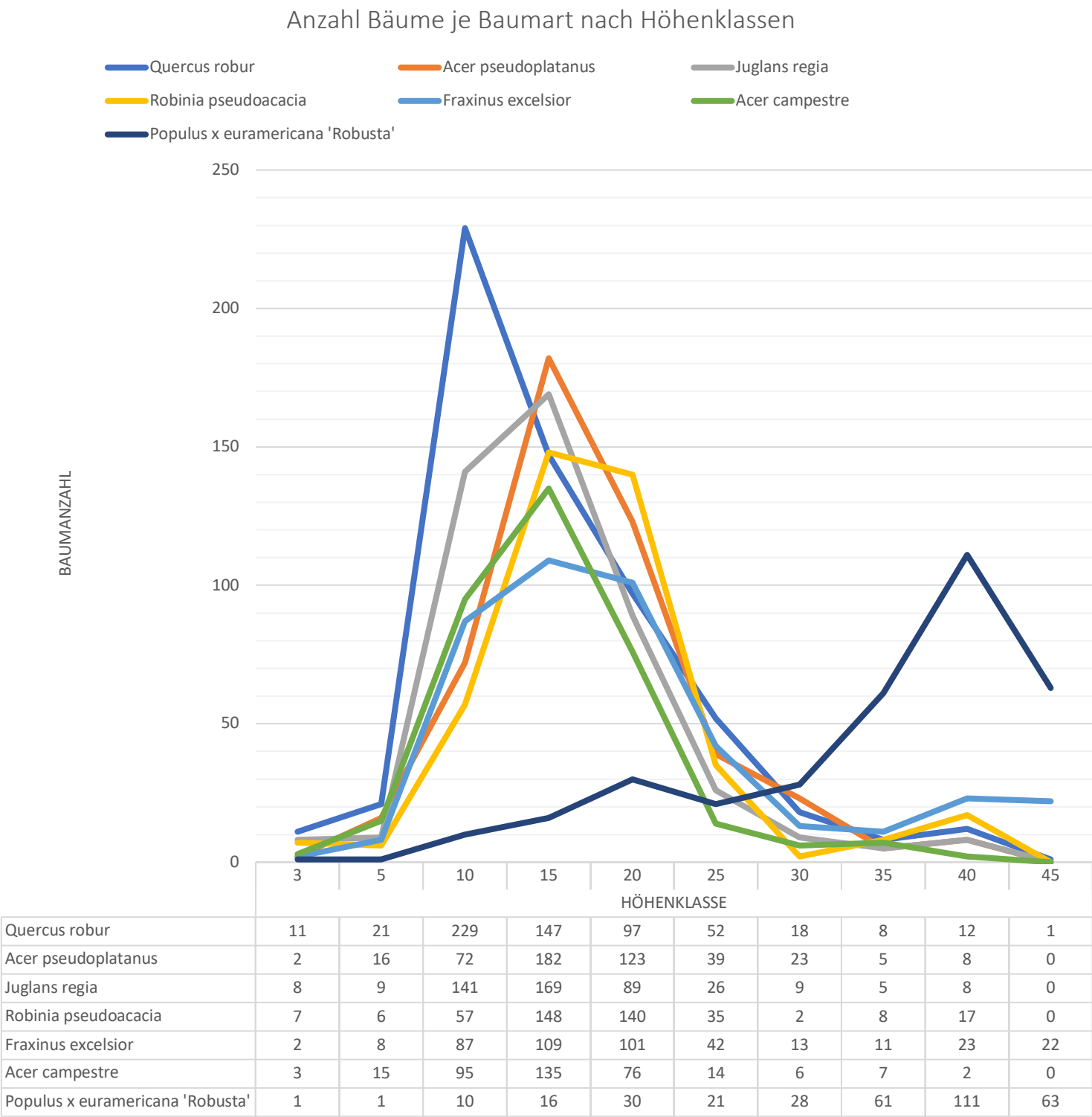
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Quercus robur	83	143	103	96	87	44	23	12	4	1
Acer pseudoplatanus	31	67	102	127	92	31	11	6	2	1
Juglans regia	24	74	100	130	90	28	7	9	2	0
Robinia pseudoacacia	23	49	92	127	84	22	3	12	8	0
Fraxinus excelsior	34	62	71	86	77	41	45	2	0	0
Acer campestre	31	67	108	82	38	11	7	4	3	2
Populus x euramericana 'Robusta'	5	19	18	30	28	43	100	41	29	29

Anzahl Bäume je Baumart nach Durchmesserklassen

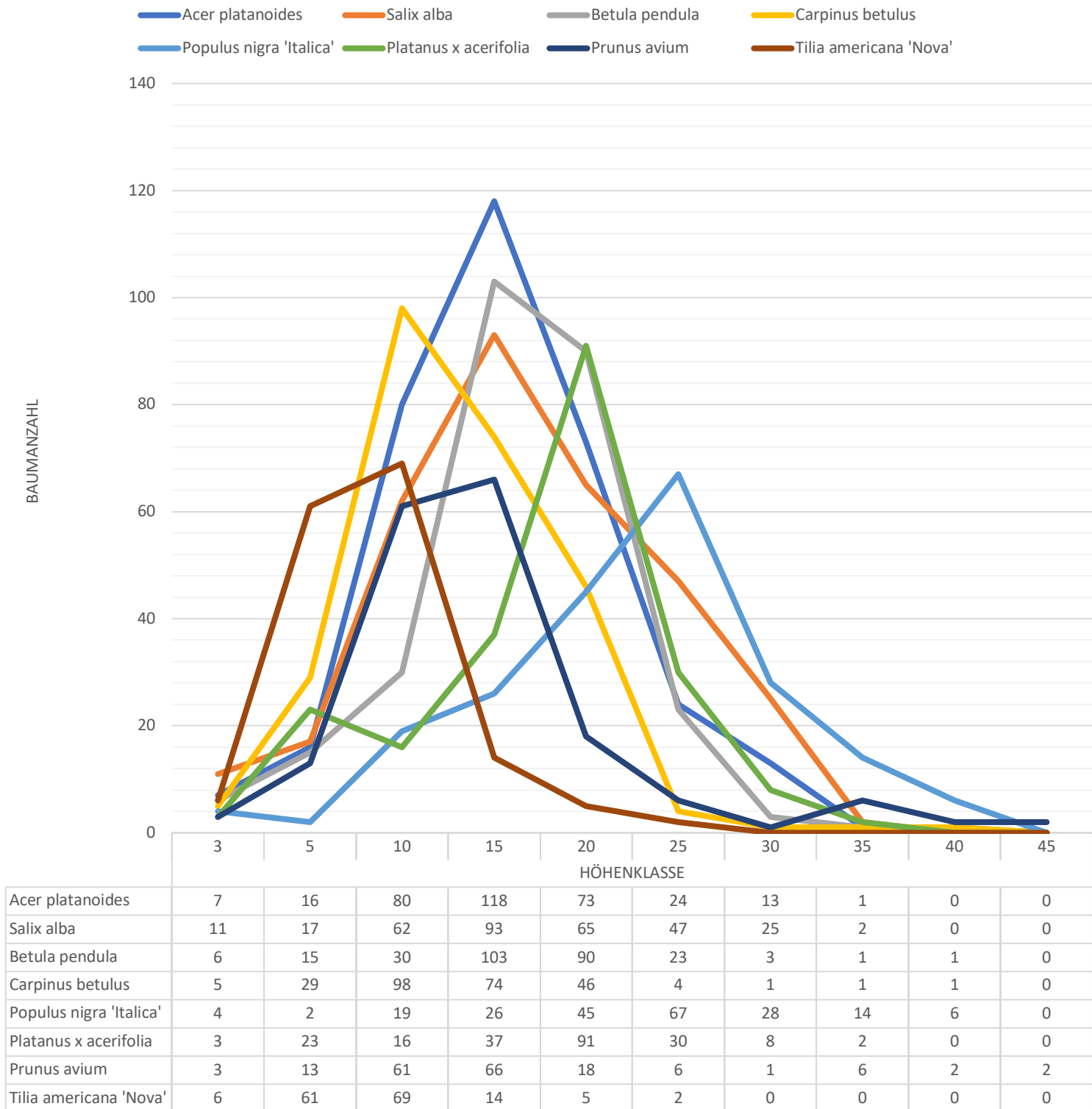


	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Acer platanoides	50	40	63	113	49	15	1	1	0	0
Salix alba	31	60	75	80	45	27	4	0	0	0
Betula pendula	23	53	79	79	30	5	2	0	0	0
Carpinus betulus	79	39	43	60	35	3	0	0	0	0
Populus nigra 'Italica'	13	19	28	32	28	29	21	16	7	18
Platanus x acerifolia	37	15	17	60	57	18	4	1	1	0
Prunus avium	21	24	51	28	11	5	1	3	1	3
Tilia americana 'Nova'	96	49	7	4	1	0	0	0	0	0

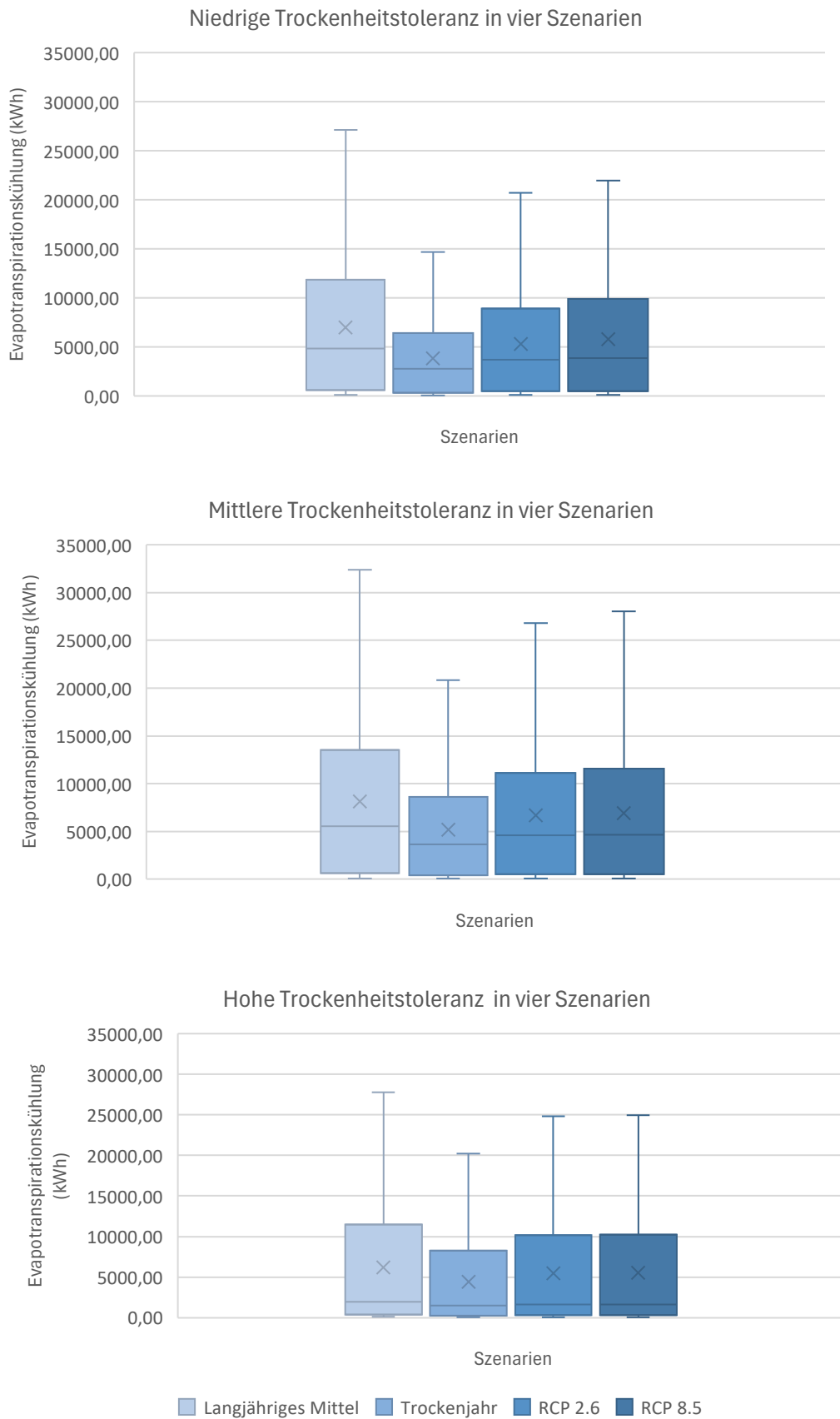
Anhang 3 Verteilung der Höhenklassen von den fünfzehn am häufigsten vorkommenden Baumarten in Speyer. Daten basierend auf bereitgestelltem Kataster (2025).



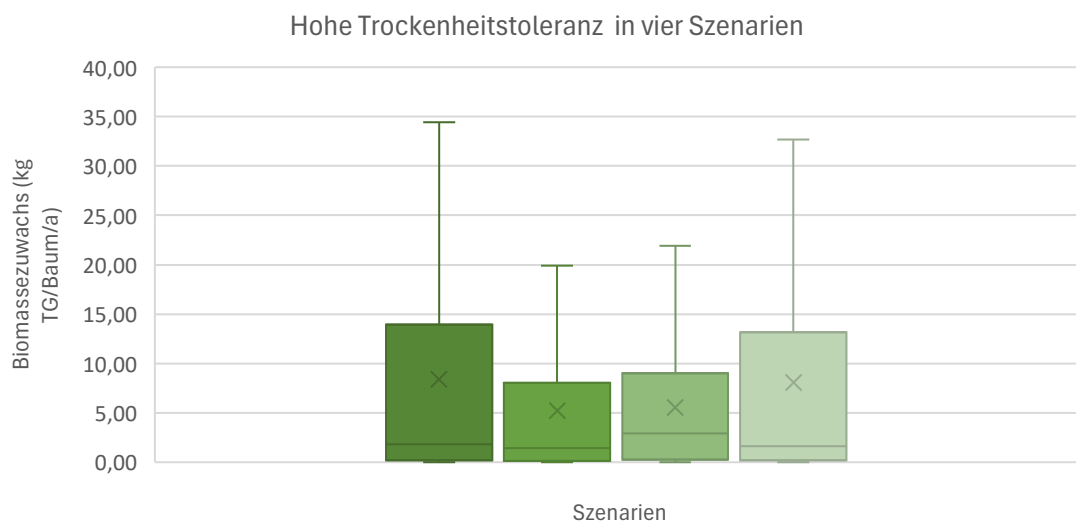
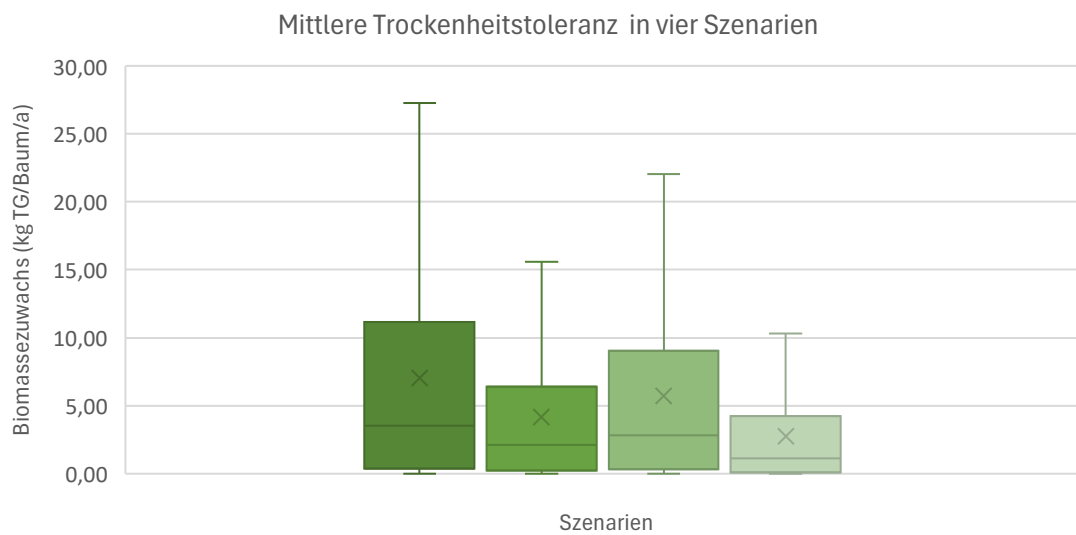
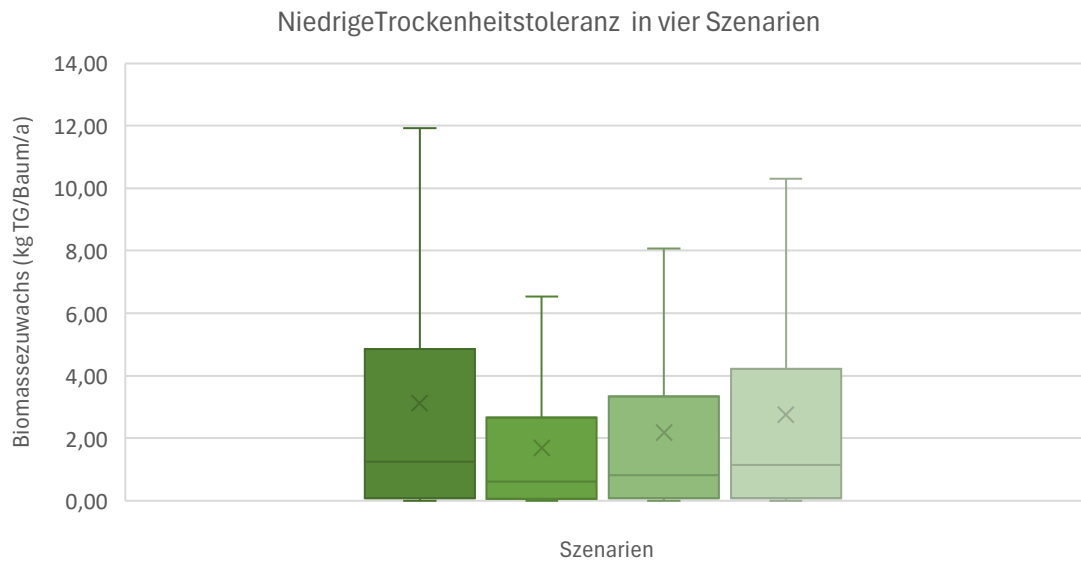
Anzahl Bäume je Baumart nach Höhenklassen



Anhang 4 Evapotranspirationskühlung (kWh) der Bäume des Baumkatasters in Speyer nach Trockenheitstoleranz und den jeweiligen simulierten Klimabedingungen.



Anhang 5 Biomassezuwachs (kg Tg/Baum/a) der Bäume des Baumkatasters in Speyer nach Trockenheitstoleranz und den jeweiligen simulierten Klimabedingungen.



■ Langjähriges Mittel
 ■ Trockenjahr
 ■ RCP 2.6
 ■ RCP 8.5

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe des Literaturzitats gekennzeichnet. Das gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen sowie für Quellen aus dem Internet und unveröffentlichte Quellen. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und war bisher nicht Bestandteil einer Studien- oder Prüfungsleistung.

München, 15.01.2026
Ort, Datum



Unterschrift